# 「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」
# 事後評価報告書

平成２２年２月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

平成２２年２月

独立行政法人新エネルギー･産業技術総合開発機構
　理事長　村田　成二　殿

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 西村　吉雄

ＮＥＤＯ技術委員・技術委員会等規程第３２条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

目　次


| | |
|---|---|
| はじめに | 1 |
| 分科会委員名簿 | 2 |
| 審議経過 | 3 |
| 評価概要 | 4 |
| 研究評価委員会におけるコメント | 7 |
| 研究評価委員会委員名簿 | 8 |
| | |
| 第１章　評価 | |
| 　１．プロジェクト全体に関する評価結果 | 1-1 |
| 　　１．１　総論 | |
| 　　１．２　各論 | |
| 　２．個別テーマに関する評価結果 | 1-21 |
| 　　２．１　高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発 | |
| 　　２．２　高効率・高密度インバータユニット技術開発 | |
| 　３．評点結果 | 1-34 |
| | |
| 第２章　評価対象プロジェクト | |
| 　１．事業原簿 | 2-1 |
| 　２．分科会における説明資料 | 2-2 |
| | |
| 参考資料１　評価の実施方法 | 参考資料 1-1 |
| 参考資料２　評価に係る被評価者意見 | 参考資料 1-2 |

# はじめに

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」の事後評価報告書であり、第１８回研究評価委員会において設置された「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」（事後評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第２４回研究評価委員会（平成２２年２月５日）に諮り、確定されたものである。

平成２２年２月
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」

事後評価分科会委員名簿

（平成２１年９月現在）

| | 氏名 | 所属、役職 |
|---|---|---|
| 分科会長 | ふゆき たかし<br>冬木 隆 | 奈良先端科学技術大学院大学<br>物質創成科学研究科 教授 |
| 分科会長<br>代理 | きもと つねのぶ<br>木本 恒暢 | 京都大学 大学院工学研究科 教授 |
| 委員 | かとう としじ<br>加藤 利次 | 同志社大学 工学部電気工学科 教授 |
| | かねこ ただあき<br>金子 忠昭 | 関西学院大学 理工学部物理学科 教授 |
| | ただの ひろし<br>只野 博 | (株)豊田中央研究所<br>情報・エレクトロニクス研究部 部長 |
| | にしだ やすゆき<br>西田 保幸 | 千葉工業大学 工学部電気電子情報工学科 教授 |
| | やまさき みきお<br>山崎 幹夫 | (株)ＮＴＴファシリティーズ 研究開発本部<br>パワーシステム部門 部門長 |

敬称略、五十音順

## 審議経過

● 現地調査会（平成２１年８月２０日）

三菱電機株式会社　先端技術総合研究所（尼崎市塚口本町）

● 第１回　分科会（平成２１年９月３日）

公開セッション

１．開会、分科会の設置、資料の確認

２．分科会の公開について

３．評価の実施方法について

４．評価報告書の構成について

５．プロジェクトの概要説明

非公開セッション

６．プロジェクトの詳細説明

７．全体を通しての質疑

公開セッション

８．まとめ・講評

９．今後の予定、その他、閉会

● 第２４回研究評価委員会（平成２２年２月５日）

# 評価概要

１．総論

１）総合評価

インバータに代表される電力変換技術はあらゆる産業に不可欠であり、SiC 素子の開発はエネルギー利用効率向上の面から世界的に注目を集めている。SiC 材料固有の物性に由来した電力変換効率の低減化を実際のシステムレベルで実証することには多くの困難さを有していた。計画を着実に遂行し、パワーデバイスの大容量化と信頼性向上、および SiC デバイスを搭載したインバータの低損失化と高密度化を実証し、14kVA－11kW のユニットでインバータの損失 70%低減するという世界水準の成果を創出したことは高く評価できる。本成果は産業界へも極めて高いインパクトを与える。

実用化のためには、今後デバイスマスプロダクションプロセス確立とシステムの信頼性確保及び低コスト化が必須である。

２）今後に対する提言

デバイス作製の基本プロセスに、未だ、多くのノウハウに依存する点がより広い普及展開に障壁となる可能性がある。また、電子物性の解析にもやや不十分な点がある。信頼性の解析において、より実使用状況下での特性解明が望まれる。

デバイスの物性・機能評価には、精度保証や信頼性認証に関して大学や公的機関等第三者機関との適切な連携研究が必要であり、マスプロダクションプロセス開発の中心となる企業グループとの適切な連携システムが望まれる。また、ウェハ評価の成果などを広く公開し、得られた多数のデータおよび知見が評価方法の標準化をも含めてまとめて、それらが各メーカーにおいて活用されることを期待する。また、実用化に向けた課題にとその解決に至る方策を明確に整理していくことが重要。特に、SiC デバイス、インバータの最大の特徴である高温動作について、さらなる見極めと問題点の抽出を行うことが重要である。

事業化については、本事業内で使用されたプロセスのみで実現できるかは疑問であり、抽出された要素技術が抱える課題を解決するための新たな革新的技術開発が知財戦略の構築とともに必要となろう。また、低コスト化を阻む最大の要因として基板ウェハの価格が挙げられるが、ウェハコストの低減化には市場自体の拡大化を前提とした事業化戦略が必要となる。

本事業からの特許出願は 14 件であったが、米国 CREE 社が広範囲に知財を押さえている現状を考慮すると、今後のパワーエレクトロニクス関係プロジェクト運営に際しては、明確な知財戦略に基づく開発体制の構築が重要である。

今後は、成果の共有を踏まえた、国家レベルで総合的な知財戦略を担う部署・

機関の設置が必要となろう。システムレベルでのSiC材料の優位性が実証され、また多くの要素技術における課題が抽出されたことから、事業化の方向性に適した全体戦略の構築が求められる。特に米国 CREE 社等の先行技術を有する企業戦略との知財戦略の上での差別化が重要となる。

２．各論

１）事業の位置付け・必要性について

インバータに代表される電力変換技術はあらゆる産業に不可欠であり、SiC 素子の開発はエネルギー利用効率向上の面から世界的に注目を集めている。

デバイス開発から装置化まで複数の民間技術を融合するためにNEDOが果たしたバインダー的役割は、予算面だけに止まらず、総合技術の育成や開発競争における時間的な戦略面でも極めて重要かつ妥当であった。また、当該分野の市場は今後、急速に成長すると予測され、競争力を維持するためにも、本プロジェクトの目的、意義は妥当である。

今回実証した実際の機器レベルでの電力変換効率の低減および背景にある結晶自体の特性評価技術は、費用対効果の点で、十分に説得力のあるものと言える。

２）研究開発マネジメントについて

SiC を用いた低損失インバータユニットの損失を 30%以下に低減するという目標と変換器電力密度 10W/cm3 を実証するという評価指標は世界的に見ても当を得たものであり、研究開発計画についても具体性があり、適切なマイルストーンが設定されている。基礎的な検討を行いつつ、実用化に近い形態での開発、検討を実施している。基盤技術となる SiC 基板の作成・評価を計画的にマネジメントした点は評価できる。また、その目標設定、事業体制とも、極めて妥当であったと考える。本事業において設置されたウェハ品質管理室は総合的な司令塔としての役割を担う画期的なものであった。

今後は、成果の共有を踏まえた総合的な知財戦略を担う部署・機関の設置が必要となろう。システムレベルでの SiC 材料の優位性が実証され、また多くの要素技術における課題が抽出されたことから、事業化の方向性に適した全体戦略の構築が求められる。特に米国 CREE 社等の先行技術を有する企業戦略との知財戦略の上での差別化が重要となる。

３）研究開発成果について

高効率・高密度インバータユニット技術、およびその革新的高度化を目指したインバータの大容量化、信頼性向上、高パワー密度化のいずれの課題においても、当初に設定された目標を十分に達成している。損失 70%減かつ電力密度

$10W/cm^3$ という高い挑戦的目標を満足するインバータユニットを実現したことは高く評価できる。学会発表、論文発表、特許出願にも積極的であり、広報や成果普及の観点でも良好である。「グリーン IT 協議会会長賞」や国際会議での招待講演などで、広く成果が公開され、評価を受けたことは、特筆される。

しかし、プロセス改善がいわゆるノウハウに依存する点が多く、また、詳細な電子物性解析結果とプロセスとの関連が解明されていない点もある。プロジェクト終了後も、プロセスの科学的な背景の解明を進めることによって、広範な技術の普及に繋がる可能性がある。

４）実用化の見通しについて

SiC 利用技術の応用可能分野は、SiC デバイスが有する本来の性能と特徴を考慮すれば、従来の Si デバイスの高電圧大電力利用領域を更に拡げる広大な領域と考えられる。インバータの低損失化小形化によって、少なくとも動力用インバータへの応用展開可能なことが明確となった。SiC 半導体の優位性が立証され、SiC デバイスを用いたシステムが十分に実用的なものであることを社会に示した。SiC ウェハの大口径化、高品質化も同時に進行しており、実使用状況下における信頼性の評価やコストを含めて実用化のシナリオを真剣に考える時期が到来した。

しかし、実用化に向けては、残された課題の整理・検討を引き続き実施することが重要。例えば、実使用状況下における信頼性の評価や、ダイナミックな使用環境を考慮した評価実験や、更なる歩留まりや信頼性の向上を目指したウェハやデバイスの高度化研究を進めることが重要である。

Si パワーデバイスとの競合を考えると、低コスト化は必須である。従って、デバイスとしての信頼性を保持しつつ低コスト化を実現するための開発が重要となる。本プロジェクト終了後も、抽出された要素技術が抱える課題を解決するための新たな革新的技術開発が知財戦略の構築とともに必要となろう。

# 研究評価委員会におけるコメント

第２４回研究評価委員会（平成２２年２月５日開催）に諮り、了承された。研究評価委員会からのコメントは特になし。

研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

| 職　位 | 氏　名 | 所属、役職 |
| --- | --- | --- |
| 委員長 | 西村　吉雄 | 学校法人早稲田大学大学院　政治学研究科<br>（科学技術ジャーナリスト養成プログラム）<br>客員教授 |
| 委員長代理 | 吉原　一紘 | オミクロンナノテクノロジージャパン株式会社　最高顧問 |
| 委員 | 安宅　龍明 | オリンパス株式会社　新規中核事業企画本部<br>ヘルスケア事業開発部　企画グループ<br>コーディネーター |
| | 伊東　弘一 | 学校法人早稲田大学　理工学術院総合研究所<br>客員教授（専任） |
| | 稲葉　陽二 | 日本大学　法学部　教授 |
| | 大西　　優 | 株式会社カネカ　顧問 |
| | 尾形　仁士 | 三菱電機エンジニアリング株式会社　取締役社長 |
| | 小林　直人 | 学校法人早稲田大学　研究戦略センター　教授 |
| | 小柳　光正 | 国立大学法人東北大学大学院　工学研究科<br>バイオロボティクス専攻　教授 |
| | 佐久間一郎 | 国立大学法人東京大学大学院　工学系研究科<br>精密機械工学　精密機械工学専攻　教授 |
| | 菅野　純夫 | 国立大学法人東京大学大学院　新領域創成科学研究科<br>メディカルゲノム専攻　教授 |
| | 冨田　房男 | 放送大学　北海道学習センター　所長 |
| | 架谷　昌信 | 愛知工業大学　工学機械学科<br>教授・総合技術研究所所長 |
| | 宮島　　篤 | 国立大学法人東京大学　分子細胞生物学研究所　教授 |

# 第１章　　評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の「○」「●」「・」が付された箇条書きは、評価委員のコメントを原文のまま、参考として掲載したものである。

## １．プロジェクト全体に関する評価結果
### １．１　総　論
#### １）総合評価

インバータに代表される電力変換技術はあらゆる産業に不可欠であり、SiC素子の開発はエネルギー利用効率向上の面から世界的に注目を集めている。SiC材料固有の物性に由来した電力変換効率の低減化を実際のシステムレベルで実証することには多くの困難さを有していた。計画を着実に遂行し、パワーデバイスの大容量化と信頼性向上、およびSiCデバイスを搭載したインバータの低損失化と高密度化を実証し、14kVA－11kWのユニットでインバータの損失 70％低減するという世界水準の成果を創出したことは高く評価できる。本成果は産業界へも極めて高いインパクトを与える。

実用化のためには、今後デバイスマスプロダクションプロセス確立とシステムの信頼性確保及び低コスト化が必須である。

＜肯定的意見＞

○SiC パワーエレクトロニクス分野の技術開発には、豊富な経験に裏打ちされた高度なつくり込みを必要とするアナログデバイスの開発という側面と、また結晶に関わる材料自体のつくり込みが高い次元で完全性を要求されるプロセス開発という側面をもつ。両分野とも伝統的に、日本の産業競争力の中では優位性を確保してきた分野であるが、SiC の材料プロセスでは Si プロセス以上の高温環境が必要なことから、今日の成熟した高度な Si プロセスの産業インフラを直接適用できず、従って、SiC 材料固有の物性に由来した電力変換効率の低減化を実際のシステムレベルで実証することには多くの困難さを有していた。低炭素社会の実現に向けて、日本の産業競争力を確保することが戦略的にも求められる非常に重要な省エネ技術と位置付けられる。現在まで、主要な国々で SiC 材料プロセスおよびデバイス化への取り組みは行われてきたが、ボトルネックであったウェハ製造においては米国 CREE 社の優位性が顕著な分野であった。この優位性を得るため、米国は CREE 一社のみにおいても国防予算を含む 230 億円以上の公的な研究開発資金（200-2007 年間の総計、公開資料をもとに概算）を投じてきたものの、SiC 材料物性の優位性に依拠したシステムレベルでの公表可能な検証例は少なく、具体的な技術課題の共有化が進展しているとは言い難い状況にあった。今回の NEDO 事業において実証した実際の機器レベルでの電力変換効率の低減および背景にある結晶自体の特性評価技術は、費用対効果の点で、十分に説得力のあるものと言える。今後の民生分野における産業化を推進する上で欠かせない、研究開発領域の裾野を拡大する上で大きな一歩と成り得るものである。

本事業では、多数の研究開発組織が参画したことから、それぞれの組織が実証に用いたウェハ特性の標準化が課題であったが、開発体制の中に設けられた組織横断的なウェハ品質管理室の役割は評価に値するものであった。ボトルネックであったウェハの供給に関しては国内企業の事業化努力により販売体制が整いつつあり、材料からシステムまでの総合的な技術開発環境が構築されつつある。本事業の重要な成果の一つは、今後の総合的な技術開発環境自体を国内に構築し得たことにあると考えられる。

○3 年間という短期間にデバイス実現のために計画した研究を着実に遂行し、回路設計や実装技術を進化させ、インバータの損失を 70%低減するという著しい総合的成果を創出したことは高く評価できる。

○省エネ、低炭素社会実現に向け、電力の高効率・低損失の変換、活用は必須である。新素材 SiC を用いたデバイスでそれを実現するという国家的にも重要なプロジェクトである。実用化にも直結する世界最高の機能を有するデバイスの実現、電力変換システムの試作、と今後の普及展開への目処を建てた成果は非常に大きい。

○「個別テーマに関するコメント票」で述べた通り、全体的に、成果は十分出ている。

○省エネルギーへ貢献が期待できる SiC デバイスの開発、インバータでの効果実証に対し、目標を満足する成果が得られ、今後の展開が期待できる。

○重要課題である低損失インバータ実現の切り札として期待されているワイドギャップ半導体 SiC を用いたパワーデバイスの大容量化と信頼性向上、および SiC デバイスを搭載したインバータの低損失化と高密度化を実証し、当該分野で世界水準の成果を着実に挙げている。本格的実用化には、低価格ウェハの安定供給などの課題があるものの、本プロジェクトとしては十分な基盤技術を確立できたと考える。

○本事業は、省エネルギー技術に基づく高度な情報化社会を実現する上で時宜を得た必要かつ重要なプロジェクトである。これに対して特に SiC デバイスの適用により高効率・高密度インバータの基盤技術の開発において、有用かつ高度な成果が得られている。

＜問題点・改善すべき点＞

●高温装置産業インフラ自体が未成熟な SiC 材料技術の特殊性と、大電流高耐圧下での高度なつくり込みが必要とされるアナログデバイス分野であることから、SiC 事業への参入障壁は他の半導体材料分野と比較して高く、新たな企業や大学などの研究開発主体の拡大化や装置を含むインフラ分野へ波及効果が今後の産業展開には欠かせない。そのためには、上流から下流までの技術課題の明確

化が重要であり、最下流のシステムレベルでの知見から得られた課題を再度、上流側に還流する循環型の技術開発が必要となる。それはシステムレベルでの知見を得て初めて可能となるものである。今回の事業は、目的および実施体制ともに、循環型の技術開発を目指したものであった。産総研を中心とする共同研究体制下での個別プロセスと材料技術に関する課題抽出と評価法の提示、そして三菱電機を主体とするシステムレベルでのパフォーマンス検証である。そこに課題があるとすれば、三菱電機側で実証した"SiC インバータユニットで世界最高の電力損失 70%減"に用いられた個別プロセスが、産総研グループ側によって課題抽出されたプロセスのどの部分を用いて実現されたのか対応関係が必ずしも明らかでないことである。電力損失 70%減という成果が、産総研グループが提示した包括的な材料・プロセスマップの中で、どの程度のマージンを含むものなのか、またどのプロセスが大きな制限要因となっているか、が問われよう。ノウハウまたは知的財産等の関係で具体的な技術内容を提示するまでは望まないものの、将来の同分野の展開のためにも、70%低減化を実現したプロセス技術の位置付けについて言及することは重要であったと考える。

SiC 分野には前記参入障壁の高さ故の知識の囲い込みが進んでおり（参入企業の事業化リスクを考慮すれば当然ではあるが）、国費を投じてプロジェクトを推進する意義の一つは情報の共有化と知財の獲得にある。本事業からの特許出願は 14 件であったが、米国 CREE 社は現在まで約 400 件程度の米国特許を所有することからも、明確な知財戦略に基づく開発体制の構築が今後は必要と考えられる。

高効率・高密度インバータが求められる事業分野として低コスト化が必要不可欠なハイブリッドカー等への搭載が想定される。低コスト化を実現するための生産技術の確立には、いまだ多くの技術的課題を抱えており、それは従来からのボトルネックとされていたウェハ自体の低価格化だけで解決できるものではない。高温プロセス技術・高温実装技術等においても、低コスト化を実現し得る新たなイノベーションが求められる。

●核となるデバイス技術とインバータ回路設計技術との有機的（相互）関係の重要性について報告の中でも明示協調すべきである。例えば、どのようなフィードバックが行なわれたかなど。

●デバイス作製の基本プロセスに、未だ、多くのノウハウに依存する点が残っているが、より広い普及展開に障壁となる可能性がある。また、関連して、電子物性の解析にもやや不十分な点がある。信頼性の解析において、より、実使用状況下での特性解明が望まれる。

●SiC パワーデバイス以外のインバータの実装などの面での「つくばサイト」と「伊丹サイト」との連携が薄かった様に感ずる。

●各サイトの連携をより強くすることで、もっとも低いオン抵抗をもったSiCデバイスを用いた超低損失インバータが実証できたのではと思われる。

＜その他の意見＞

・可能であれば、論文件数に従事研究者のキャリア年数などの分析を加えて、関連技術者や関連研究者がこのプロジェクトを経験して大いに成長・育成されたことも大きな成果としてアピールしていただきたい。

・つくばサイトに参画した大学・企業と実際にインバータユニットを開発した三菱電機との間で、ノウハウの共有と独自技術の確保、知的財産の分配、など利益相反の問題を解決し、日本全体としてより広く普及展開を目指す、システムの構築が必要である。

・さらなる展開を行うための課題が明らかになった意義は大きい。

・本事業により、得られた知見が幅広く活用され、パワーエレクトロニクス機器として、できるだけ速やかな実現化・実用化が重要である。

2）今後に対する提言

デバイス作製の基本プロセスに、未だ、多くのノウハウに依存する点がより広い普及展開に障壁となる可能性がある。また、電子物性の解析にもやや不十分な点がある。信頼性の解析において、より実使用状況下での特性解明が望まれる。

デバイスの物性・機能評価には、精度保証や信頼性認証に関して大学や公的機関等第三者機関との適切な連携研究が必要であり、マスプロダクションプロセス開発の中心となる企業グループとの適切な連携システムが望まれる。また、ウェハ評価の成果などを広く公開し、得られた多数のデータおよび知見が評価方法の標準化をも含めてまとめて、それらが各メーカーにおいて活用されることを期待する。また、実用化に向けた課題にとその解決に至る方策を明確に整理していくことが重要。特に、SiC デバイス、インバータの最大の特徴である高温動作について、さらなる見極めと問題点の抽出を行うことが重要である。

事業化については、本事業内で使用されたプロセスのみで実現できるかは疑問であり、抽出された要素技術が抱える課題を解決するための新たな革新的技術開発が知財戦略の構築とともに必要となろう。また、低コスト化を阻む最大の要因として基板ウェハの価格が挙げられるが、ウェハコストの低減化には市場自体の拡大化を前提とした事業化戦略が必要となる。

本事業からの特許出願は 14 件であったが、米国 CREE 社が広範囲に知財を押さえている現状を考慮すると、今後のパワーエレクトロニクス関係プロジェクト運営に際しては、明確な知財戦略に基づく開発体制の構築が重要である。

今後は、成果の共有を踏まえた、国家レベルで総合的な知財戦略を担う部署・機関の設置が必要となろう。システムレベルでの SiC 材料の優位性が実証され、また多くの要素技術における課題が抽出されたことから、事業化の方向性に適した全体戦略の構築が求められる。特に米国 CREE 社等の先行技術を有する企業戦略との知財戦略の上での差別化が重要となる。

＜今後に対する提言＞

・総合的な知財戦略を担う部署・機関の設置が今後は必要となろう。システムレベルでの SiC 材料の優位性が実証され、また多くの要素技術における課題が抽出されたことから、事業化の方向性に依存した全体戦略の構築が求められる。特に米国 CREE 社等の先行技術を有する企業戦略との知財戦略の上での差別化が重要となる。

システムレベルでの電力効率の低減化の実証により、実用化のイメージに対して社会的コンセンサスが得られるに至ったものと評価できる。低炭素社会の実現は社会全体、とくに日本の産業界にとって、真剣な対応が求められる分野であることから、SiC パワーデバイスへの期待は今後さらに増大するものと考

えられる。課題となる要素技術に関しても、その優先順位を含め、社会的な認知が今後広まると考えられる。Si パワーデバイスを凌駕する性能を低コストで実現することが、今後の実用化展開には必須であるが、低コスト化の部分に大きな課題が残されている。しかし社会的な期待が広まることで、事業化機会をうかがう新たなる参入企業が増え、装置インフラ等も今後整うことが予想される。CO2 削減に向けたグリーンテクノロジーの一翼を担う戦略技術として、また高性能ハイブリッドカー開発のための差別化技術として、今後の真剣なる事業化展開が予想される。

SiC 材料の特性を顕在化させた高効率・高密度インバータユニットが適用可能な産業分野として産業用モータ、ハイブリッドカー等が挙げられているが、それぞれの適用分野の性格にもよるが、Si パワーデバイスとの競合を考える上で低コスト化は今後必須である。システムという最終段階での SiC 半導体の優位性が立証された現在、さらなる性能向上はもちろん必要であるが、デバイスとしての信頼性を保持しつつ低コスト化を実現するための開発が重要となる。本事業内で使用されたプロセスのみで実現できるかは疑問であり、抽出された要素技術が抱える課題を解決するための新たな革新的技術開発が知財戦略の構築とともに必要となろう。また、低コスト化を阻む最大の要因として基板ウェハの価格が挙げられるが、それは過去からも言われ続けた内容であり、ウェハコストの低減化には市場自体の拡大化を前提とした事業化戦略が必要となる。

・電力変換のパワー密度 10W/cm3 を実証し、50W/cm3 を見通すに至ったことは世界をリードする成果であり、この技術の世界的優位性を維持進展させることは日本の産業や経済を発展させ、学術的地位を誇り、次世代の研究者や技術者を育成するために極めて重要である。特に、このプロジェクトは、具体的応用（市場ターゲット）を設定した研究推進手法が、物理理論や材料研究（上流）から回路設計法や装置製造技術（下流）までの多くの研究開発活動を同時にかつ網羅して活性化できることを実証した。今後も、自動車、船舶、鉄道、航空機、通信、放送、衛星などの電力変換へ市場ターゲットを拡大しながらプロジェクトを継続すべきである。

・政策上の位置づけのため、ブロードバンド・IT を前面に立てた NEDO 目標になったが、今後の見通しでは、ハイブリッド車、FA、等への実用化が主に目指す方向となるであろう。その目標に向けた「デバイスマスプロダクションプロセス確立」と「システムの信頼性確保」が必須である。デバイスの物性・機能評価には、精度保証や信頼性認証に関して大学や公的機関等第三者機関との適切な連携研究が必要である。

・今後とも SiC パワーデバイスに関する技術開発は重要であるが、本プロジェクトで見通しが付いたので、今後はパワーデバイス以外のコンポーネンツに関す

る具体的検討が重要になってくると感ずる。本プロジェクトの成果を基に、国内に於けるこの分野の研究開発がより一層盛んになる事が期待できる。

・実用化のためには、残された課題に対する解決手段、またはそれに至る方策を整理しておくことが重要。今回の成果をこのような観点で整理していただくと良い。

・SiC デバイス、インバータの最大の特徴である高温動作について、さらなる見極めと問題点の抽出を行っていただきたい。また、ウェハ評価の成果を広く公開し、当該分野の発展に貢献していただきたい。

・インバータをより高密度化するためには、パブリックコメントにもあったように、受動素子も含めた装置全体の最適化が必要である。また本事業の成果により、スイッチング周波数のより高周波化が可能となるが、これに伴う EMC 対策等の新たな課題にも対応する必要がある。

＜その他の意見＞

・本プロジェクトでは高温動作や高周波動作などの SiC デバイスの Si デバイスに対する優位性が具体的かつ十分に示されていないので、今後は Si デバイスでは実現不可能な SiC デバイスの特有の優位性を引き出すための実証研究を継続して推進すべきである。

・SiC パワーデバイスの開発とシステムへの展開は、エネルギー環境問題の解決には非常に重要な課題である。世界的な研究開発状況を精査し、普及・展開に向け、各国との協力・協調体制の構築が至急に望まれる。

・SiC エピタキシャル成長の重要性が指摘されている。高品質を実現するためどのような検討をし、どのようにアプローチすべきかを示すことも重要と思う。

・本事業で得られた多数のデータおよび知見が評価方法の標準化をも含めてまとめられ、それらが各メーカーにおいて活用されることが望まれる。

## １．２　各　論

### １）事業の位置付け・必要性について

| |
|---|
| インバータに代表される電力変換技術はあらゆる産業に不可欠であり、SiC素子の開発はエネルギー利用効率向上の面から世界的に注目を集めている。<br>デバイス開発から装置化まで複数の民間技術を融合するためにNEDOが果たしたバインダー的役割は、予算面だけに止まらず、総合技術の育成や開発競争における時間的な戦略面でも極めて重要かつ妥当であった。また、当該分野の市場は今後、急速に成長すると予測され、競争力を維持するためにも、本プロジェクトの目的、意義は妥当である。<br>今回実証した実際の機器レベルでの電力変換効率の低減および背景にある結晶自体の特性評価技術は、費用対効果の点で、十分に説得力のあるものと言える。 |

＜肯定的意見＞

○SiCパワーエレクトロニクス分野の技術開発には、豊富な経験に裏打ちされた高度なつくり込みを必要とするアナログデバイスの開発という側面と、また結晶に関わる材料自体のつくり込みが高い次元で完全性を要求されるプロセス開発という側面をもつ。両分野とも伝統的に、日本の産業競争力の中では優位性を確保してきた分野であるが、SiCの材料プロセスではSiプロセス以上の高温環境が必要なことから、今日の成熟した高度なSiプロセスの産業インフラを直接適用できず、従って、SiC材料固有の物性に由来した電力変換効率の低減化を実際のシステムレベルで実証することには多くの困難さを有していた。低炭素社会の実現に向けて、日本の産業競争力を確保することが戦略的にも求められる非常に重要な省エネ技術と位置付けられる。現在まで、主要な国々でSiC材料プロセスおよびデバイス化への取り組みは行われてきたが、ボトルネックであったウェハ製造においては米国CREE社の優位性が顕著な分野であった。この優位性を得るため、米国はCREE一社のみにおいても国防予算を含む230億円以上の公的な研究開発資金（200-2007年間の総計、公開資料をもとに概算）を投じてきたものの、SiC材料物性の優位性に依拠したシステムレベルでの公表可能な検証例は少なく、具体的な技術課題の共有化が進展しているとは言い難い状況にあった。今回のNEDO事業において実証した実際の機器レベルでの電力変換効率の低減および背景にある結晶自体の特性評価技術は、費用対効果の点で、十分に説得力のあるものと言える。今後の民生分野における産業化を推進する上で欠かせない、研究開発領域の裾野を拡大する上で大きな一歩と成り得るものである。

　本事業では、多数の研究開発組織が参画したことから、それぞれの組織が実

証に用いたウェハ特性の標準化が課題であったが、開発体制の中に設けられた組織横断的なウェハ品質管理室の役割は評価に値するものであった。ボトルネックであったウェハの供給に関しては国内企業の事業化努力により販売体制が整いつつあり、材料からシステムまでの総合的な技術開発環境が構築されつつある。本事業の重要な成果の一つは、今後の総合的な技術開発環境自体を国内に構築し得たことにあると考えられる。

○インバータに代表される電力変換技術は IT を始めとするあらゆる産業に不可欠であり、ワイドバンドギャップ素子の開発はエネルギー利用効率向上の面から世界的に注目を集めている。これに加え、本プロジェクトで利用技術の期待値である電力密度 50W/cm3 と損失７割減という劇的効果の程度を具体的に実証して見せたことは、世界的にも希なエネルギーイノベーションのひとつである。デバイス開発から装置化まで複数の民間技術（者）を融合するために NEDO が果たしたバインダー的役割は、予算面だけに止まらず、総合技術の育成や開発競争における時間的な戦略面でも極めて重要かつ妥当であった。

○省エネ・$CO^2$削減社会の実現に向け、SiC デバイスの高機能化とシステム試作を実現した成果は非常に大きい。現状では事業化に対してリスクの大きい課題に、国の支援の下に取り組み、将来の実用化への道を示したことは高く評価できる。

○本技術開発プロジェクトは、我が国の今後の低炭素化･省エネの実現とそれにまつわる技術分野での国際競争力の維持･確保の面で極めて重要であり、公共性も高い。また、国内各所に分散している技術･研究者を集約した大規模な体制で挑むべき課題であり、民間ベースでの事業では難しく NEDO の関与が必要である。

　本技術開発の成果は、これから大幅に伸びる事が予想されている IT 関係や産業応用分野でのエネルギー需要への対策として大変効果的である。

○エネルギー有効利用の観点から実施されたプロジェクトであり、重要な事業と判断できる。

○省エネルギー技術の発展は喫緊の課題であり、中でも電力変換機器の効率向上は重要である。本プロジェクトでは新しい半導体 SiC による高性能インバータ実現という挑戦的課題に取り組んでおり、我が国の戦略的基盤技術として NEDO の関与が望ましい。当該分野の市場は今後、急速に成長すると予測され、我が国の優位性を維持するためにも、本プロジェクトの目的、意義は妥当である。

○本事業は省エネルギー技術の確立のために、重要かつ必要であり、内外の動向に対して時宜を得ている。

＜問題点・改善すべき点＞

●高温装置産業インフラ自体が未成熟な SiC 材料技術の特殊性と、大電流高耐圧下での高度なつくり込みが必要とされるアナログデバイス分野であることから、SiC 事業への参入障壁は他の半導体材料分野と比較して高く、新たな企業や大学などの研究開発主体の拡大化や装置を含むインフラ分野へ波及効果が今後の産業展開には欠かせない。そのためには、上流から下流までの技術課題の明確化が重要であり、最下流のシステムレベルでの知見から得られた課題を再度、上流側に還流する循環型の技術開発が必要となる。それはシステムレベルでの知見を得て初めて可能となるものである。今回の事業は、目的および実施体制ともに、循環型の技術開発を目指したものであった。産総研を中心とする共同研究体制下での個別プロセスと材料技術に関する課題抽出と評価法の提示、そして三菱電機を主体とするシステムレベルでのパフォーマンス検証である。そこに課題があるとすれば、三菱電機側で実証した“SiC インバータユニットで世界最高の電力損失 70%減”に用いられた個別プロセスが、産総研グループ側によって課題抽出されたプロセスのどの部分を用いて実現されたのか対応関係が必ずしも明らかでないことである。電力損失 70%減という成果が、産総研グループが提示した包括的な材料・プロセスマップの中で、どの程度のマージンを含むものなのか、またどのプロセスが大きな制限要因となっているか、が問われよう。ノウハウまたは知的財産等の関係で具体的な技術内容を提示するまでは望まないものの、将来の同分野の展開のためにも、70%低減化を実現したプロセス技術の位置付けについて言及することは重要であったと考える。

　SiC 分野には前記参入障壁の高さ故の知識の囲い込みが進んでおり（参入企業の事業化リスクを考慮すれば当然ではあるが)、国費を投じてプロジェクトを推進する意義の一つは情報の共有化と知財の獲得にある。本事業からの特許出願は 14 件であったが、米国 CREE 社は現在まで約 400 件程度の米国特許を所有することからも、明確な知財戦略に基づく開発体制の構築が今後は必要と考えられる。

　高効率・高密度インバータが求められる事業分野として低コスト化が必要不可欠なハイブリッドカー等への搭載が想定される。低コスト化を実現するための生産技術の確立には、いまだ多くの技術的課題を抱えており、それは従来からのボトルネックとされていたウェハ自体の低価格化だけで解決できるものではない。高温プロセス技術・高温実装技術等においても、低コスト化を実現し得る新たなイノベーションが求められる。

●将来の実用化分野の推移を見通したデバイス・システムの目標設定を計画に組み入れることが望ましい。

●「事業の位置付け･必要性」については上述の通り異論はないが、当該 SiC パワ

ーデバイスの応用変換回路としてインバータに限らず、もっと基本的変換回路（DC-DC コンバータ）を採用すれば開発技術のより広範な利用がもたらせるのではないだろうか？

●本プロジェクトが省エネルギー化に与えるインパクト（実際に実施する各項目での）を定量的に検討する必要がある。

＜その他の意見＞

・SiC デバイスとそれを用いたシステムの国際的な情報交換の場を設け、さらに、それを、標準化の議論できるような機関まで持っていくような国としての施策方針が望まれる。

・本技術開発のターゲット（SiC パワーデバイスの開発とその利用によるインバータの高効率・高密度等）は、たとえ大がかりなプロジェクトで一旦はしかるべき成果を得たとしても本格的実用レベルに達するには高レベルの技術開発が多くの研究グループで継続的に行われる必要があろう。本プロジェクトの成果と必要性を広く国内に浸透させ、多くの研究グループがこの領域の研究に参画する為の企画が必要と感ずる。

・国際的な開発競争の中でのプロジェクト目標の重要性を位置づけるとさらに良い。

2）研究開発マネジメントについて

| |
|---|
| SiC を用いた低損失インバータユニットの損失を 30%以下に低減するという目標と変換器電力密度 10W/cm3 を実証するという評価指標は世界的に見ても当を得たものであり、研究開発計画についても具体性があり、適切なマイルストーンが設定されている。基礎的な検討を行いつつ、実用化に近い形態での開発、検討を実施している。基盤技術となる SiC 基板の作成・評価を計画的にマネジメントした点は評価できる。また、その目標設定、事業体制とも、極めて妥当であったと考える。本事業において設置されたウェハ品質管理室は総合的な司令塔としての役割を担う画期的なものであった。 |

＜肯定的意見＞

○研究開発目標であったシステムレベルでの電力変換損失の実証については、従来から予測されていたSiC物性由来の優れた特性を最終的なシステムレベルで機能を顕在化させた点で非常に意義のあるものであるものと考える。その過程では、SiC ウェハ自体の結晶品質の制御、スイッチングデバイス作製のための多くの高温プロセス開発・制御、高温実装技術の開発・制御等を含み、いずれにおいても信頼性の確保自体が同分野の長年の技術課題であった。また、本事業では、従来から SiC デバイス展開における最大のボトルネックと言われていた SiC ウェハ内の結晶欠陥について、実際のデバイス実証を通してキラー欠陥の同定と精緻な評価法を非常に短期間で確立し得たことは、真に意義深く、本事業のような公的な枠組みにおける連携なしでは到達し得なかった成果である。以上の観点から、その目標設定、事業体制とも、極めて妥当であったと考える。

SiC結晶自体にSiとは異なる物理的要因により結晶欠陥を誘発しやすく結晶品質の制御自体が本質的に困難であること、デバイス化に必須な大電流高耐圧の条件下で表面界面の制御が同じ理由で困難であること、また Si パワーデバイスとは異なる高温実装技術が必要であること等、Si パワーデバイスでは当然と考え得る解決手法が及ばない多くの領域が存在する。その課題解決には、多くの要素技術の開発が必要であり、特に Si プロセスの限界を超える高温プロセスが要請される領域では、プロセスを実証するための装置・部材にすら選択の余地は少なく、また高温実装技術にも Si プロセスからの展開を困難にさせてきた。このような状況下ではデバイス自体に信頼性を確保することが困難と考えられてきた。本事業では、その信頼性を得ることを前提にした開発目標を設定し、長年の経験を有する多くの企業の参画を促し、また長年に渡り同分野を率いてきた産総研を中心に開発体制が組まれた。SiC 結晶欠陥の真の意味での評価とは、研究開発体制内における連携が有機的に機能し、実装技術を含むデバイス

化技術自体に総合的な信頼性が確保できて初めて可能となるものである。以上の観点から、本事業の実施体制は極めて妥当であり、評価できるものである。

○SiC を用いた低損失インバータユニットの損失を 30%以下に低減するという目標と変換器電力密度 10W/cm3 を実証するという評価指標は世界的に見ても当を得たものであり、具体的かつ戦略的な技術開発要素を包含していたと考えられる。予算については、世界最小のオン抵抗実現などのマイルストーン成果の創出状況に応じて効果的かつ遅滞無く投入されていると考えられ、プロジェクトリーダーの指揮の下に関連研究機関が有機的に結集し、この基盤研究が協調的かつ強力に推進されていたことが明白に理解できる。

○基盤技術となる SiC 基板の作成・評価を計画的にマネジメントした点は評価できる。特定の一社が実ユニット開発に総合的に責任を持ち、目標を達成したことは計画体制の妥当性を示したと考えられる。

○本研究開発の目標は内外の技術動向に照らして妥当であり、投入予算面でも期間的でも同計画は妥当であると感ずる。

○基礎的な検討を行いつつ、実用化に近い形態での開発、検討を実施しており、成果の見える化として良い形態である。

○高効率・高密度インバータユニット技術、およびその革新的高度化を目指したインバータの大容量化、信頼性向上、高パワー密度化という研究開発目標は極めて妥当であり、定量的な目標値も挙げられている。

研究開発計画についても具体性があり、適切なマイルストーンが設定されている。予算規模も適切である。

実施体制については、当該分野で実績と統率力のあるリーダーを中心に、産業技術研究所、新機能素子開発協会、三菱電機を始めとする民間企業の有機的連携体制が組まれ、効率的な研究開発が推進されている。

○高効率・高密度インバータ開発のために、目標・計画・事業体制が適切であり、事業が円滑に実施されている。

＜問題点・改善すべき点＞

●＜肯定的意見＞にて述べた研究開発を実行する上で、異なる組織間の情報共有は欠かせない。また、得られた個々の結果を総合的に俯瞰するための機能も極めて重要である。その点で、本事業において設置されたウェハ品質管理室は総合的な司令塔としての役割を担う画期的なものであった。この機能を、ウェハのみならずプロセスにまで拡張することが、今後の事業化を推進する上で重要である。

総合的な知財戦略を担う部署・機関の設置が今後は必要となろう。システムレベルでの SiC 材料の優位性が実証され、また多くの要素技術における課題が

抽出されたことから、事業化の方向性に依存した全体戦略の構築が求められる。特に米国 CREE 社等の先行技術を有する企業戦略との知財戦略の上での差別化が重要となる。

●強いて改善を望むとすれば、同一分野の海外での研究開発進捗状況、国際的競争状況および友好国間の協力関係などを明確にし、本プロジェクトの国際的ポジションや役割（立ち位置）も明確に分析すべきである。

●いくつかの企業・大学が参画した「つくばサイト」における成果はそれぞれに共有され生かされたと思われるが、実ユニットを作成した「伊丹サイト」での問題点の抽出と課題への取り組みの中で、両サイト間での情報交換が片道通行になったきらいがある。知的財産権の点で、十分な相互交流が困難であるのは理解できるが、プロジェクト全体の普及促進のために、「成果の共有体制」に工夫が欲しい。

●各サイトにおける成果の出し方、示し方に若干不統一な部分が見られる。
（例えば、性能評価のための電流密度の値等）

＜その他の意見＞

・基盤技術の成果を実用化へスムースに移管するためにも言葉や定義の統一をできるだけ実施すると良い。

・特に問題とは思わないが、大学のグループの役割がやや見えにくいように感じた。

3）研究開発成果について

高効率・高密度インバータユニット技術、およびその革新的高度化を目指したインバータの大容量化、信頼性向上、高パワー密度化のいずれの課題においても、当初に設定された目標を十分に達成している。損失70%減かつ電力密度 $10W/cm^3$ という高い挑戦的目標を満足するインバータユニットを実現したことは高く評価できる。学会発表、論文発表、特許出願にも積極的であり、広報や成果普及の観点でも良好である。「グリーン IT 協議会会長賞」や国際会議での招待講演などで、広く成果が公開され、評価を受けたことは、特筆される。

しかし、プロセス改善がいわゆるノウハウに依存する点が多く、また、詳細な電子物性解析結果とプロセスとの関連が解明されていない点もある。プロジェクト終了後も、プロセスの科学的な背景の解明を進めることによって、広範な技術の普及に繋がる可能性がある。

＜肯定的意見＞

○成果目標値のクリアをしていると認められる。システムレベルでの電力損失低減化により複数の賞を受賞していることからも客観的指標として評価できるものである。また、要素技術における最大の課題であった結晶欠陥に対しては、総合的かつ緻密な評価法を確立しており、短期間のうちに複数の評価法を用いて複合的にキラー欠陥の同定が行われた。さらにシステム化に至るデバイス化技術においても各要素技術が有する課題が抽出された。今後の産業化展開に必要不可欠な全体的見地に立脚した議論を進める上で非常に有意義な知見が得られたものと評価できる。

○インバータの実証で損失 70%減かつ電力密度 $10W/cm^3$ という目標を丁度満足する成果が創出されている。この目標は３年前の研究着手時点においてはかなり高い挑戦的な値であったと想像される。さらに、この成果が結実するにはデバイスの欠陥の本質的分析と克服、世界最高レベルの低オン抵抗実現、回路設計ツール開発、実装技術開発など、関連する研究全てで通貫する成果創出が必要であったことを鑑み、プロジェクト成果として極めて象徴的であり意義深い成果である。査読付き論文件数 39 件、国際会議 33 件は関連する研究者の質の高さまたはその高まり（育成効果）を想像するに余りある。

○基板欠陥評価法の確立や単体素子の高機能達成に大きな成果を挙げた。また、素子信頼性に影響を及ぼす機構を明らかにし最終的に目標とするインバータユニットを実現したことは高く評価できる。

○成果はおおむね目標をクリアしている。

本成果は、欧米に対して遅れ気味であった SiC パワーデバイス利用の電力変換器技術の挽回を大いに助け、その普及によってこの領域の研究開発は活況を呈する。

○各項目での成果は、それぞれ目標値に到達している。また、いくつかの新しい知見も得られている。
○高効率・高密度インバータユニット技術、およびその革新的高度化を目指したインバータの大容量化、信頼性向上、高パワー密度化のいずれの課題においても、当初に設定された目標を十分に達成している。進展に応じて追加された目標についても達成しており、評価できる。また、得られた成果は、いずれも当該分野の世界水準であり、国際的にも高く評価されると考えられる。特に素子の大容量化、酸化膜の信頼性向上の成果、およびインバータユニットにおける大幅な電力損失低減実証の成果は大変優れている。学会発表、論文発表、特許出願にも積極的であり、広報や成果普及の観点でも良好である。
○世界的レベルの研究成果を達成しており、その成果の一部は論文として、また特許等に申請されている。

＜問題点・改善すべき点＞
●知財の申請が全体で 14 件と少ないことは今後の事業化展開を考える上で考慮すべきことである。低炭素社会に向け日本の産業界が戦略的に取り組むことが必要とされる核技術であるが故に、総合的な知財戦略の構築こそが国費を投入した事業の成果との認識が必要である。
●強いて改善点を挙げるならば、投じた費用に比べ延べて１４件という特許出願件数が少ない印象がある点である。ただし、基盤技術研究という位置付けを考慮すれば、その質に着目した方が健全な評価とも考えられる。
●プロセス改善がいわゆるノウハウに依存する点が多く、また、詳細な電子物性解析結果とプロセスとの関連が解明されていない点もある。より広範な技術の普及に繋がるような、プロセスの科学的な背景の解明をより一層進めて欲しい。
●世界レベルでの成果のベンチマークが欲しい。

＜その他の意見＞
・このプロジェクトに携わった研究者が今後もモチベーションを維持し、更なる偉大な成果を創出できるように、継続テーマの発展的展開を望みます。
・「グリーン IT 協議会会長賞」や国際会議での招待講演などで、広く成果が公開され、評価を受けたことは、特筆される。
・この分野の研究開発はますます加速せねばならず、これに続くプロジェクトが必要と感ずる。
・大目標である省エネルギーに対し、それぞれの到達目標がどのような意味を持つかを整理すると、成果がより分かりやすい。

・本事業で得られた多数のデータおよび知見が評価方法の標準化をも含めてまとめられ、それらが各メーカーにおいて活用されることが望まれる。

４）実用化の見通しについて

SiC 利用技術の応用可能分野は、SiC デバイスが有する本来の性能と特徴を考慮すれば、従来の Si デバイスの高電圧大電力利用領域を更に拡げる広大な領域と考えられる。インバータの低損失化小形化によって、少なくとも動力用インバータへの応用展開可能なことが明確となった。SiC 半導体の優位性が立証され、SiC デバイスを用いたシステムが十分に実用的なものであることを社会に示した。SiC ウェハの大口径化、高品質化も同時に進行しており、実使用状況下における信頼性の評価やコストを含めて実用化のシナリオを真剣に考える時期が到来した。

しかし、実用化に向けては、残された課題の整理・検討を引き続き実施することが重要。例えば、実使用状況下における信頼性の評価や、ダイナミックな使用環境を考慮した評価実験や、更なる歩留まりや信頼性の向上を目指したウェハやデバイスの高度化研究を進めることが重要である。

Si パワーデバイスとの競合を考えると、低コスト化は必須である。従って、デバイスとしての信頼性を保持しつつ低コスト化を実現するための開発が重要となる。本プロジエクト終了後も、抽出された要素技術が抱える課題を解決するための新たな革新的技術開発が知財戦略の構築とともに必要となろう。

＜肯定的意見＞

○システムレベルでの電力効率の低減化の実証により、実用化のイメージに対して社会的コンセンサスが得られるに至ったものと評価できる。低炭素社会の実現は社会全体、とくに日本の産業界にとって、真剣な対応が求められる分野であることから、SiC パワーデバイスへの期待は今後さらに増大するものと考えられる。課題となる要素技術に関しても、その優先順位を含め、社会的な認知が今後広まると考えられる。Si パワーデバイスを凌駕する性能を低コストで実現することが、今後の実用化展開には必須であるが、低コスト化の部分に大きな課題が残されている。しかし社会的な期待が広まることで、事業化機会をうかがう新たなる参入企業が増え、装置インフラ等も今後整うことが予想される。CO2 削減に向けたグリーンテクノロジーの一翼を担う戦略技術として、また高性能ハイブリッドカー開発のための差別化技術として、今後の真剣なる事業化展開が予想される。

○インバータの低損失化小形化によって、少なくとも動力用インバータへの応用展開可能なことが明確になった。SiC 利用技術の応用可能分野は、SiC デバイスが有する本来の性能と特徴を考慮すれば、従来の Si デバイスの高電圧大電力利用領域を更に拡げる広大な領域と考えられる。FET や SBD という具体的かつ基本的な素子が開発されたことにより、これら既存分野や既存領域に加え、

SiC 特有の領域開拓への応用展開が期待できる。これにより、パワーエレクトロニクスのパイ（市場規模）が拡大し、エネルギー利用効率が高まることによって、電力変換器による環境負荷の低減が進展することが具体的に予見できる状況が到来したと言える。もちろん、これらの産業領域の従事者へも恩恵が拡大することは言うまでもない。

〇4 インチ基板での実用化に供することのできるプロセス確立とインバータユニットとしての目標を達成したことは高く評価できる。具体的目標値(50W/cm$^3$)に向けた開発指針を明確にし、将来の実用化への道を拓いたことは大きな実績である。SiC デバイスを用いたシステムが十分に実用的なものであることを社会に示した業績は大きい。

〇全体として、実用化の見通しは明るいと感ずる。本プロジェクトは同領域に於ける我が国で初めての体系的なものであり、良い結果も出ているので大きな波及効果が期待できる。

〇出口イメージは、省エネルギーに繋がる高エネルギー密度・低損失インバータの開発として、明確化されている。

〇実用化に必要なマイルストーンを設定して、それを着実に達成している。SiC ウェハの大口径化、高品質化も同時に進行しており、実用化への道筋は整ってきている。コストを含めて実用化のシナリオを真剣に考える時期になったと考えられ、本プロジェクトの意義は大きい。また、本プロジェクトを通じて、特に産業界の若手が育成され、今後も当該分野の発展に貢献されるものと期待している。

〇実用化に近づいており、その見通しがたてられている。またこの研究成果は技術的・社会的に重要かつ有用であり、ひいては経済的に大きい波及効果が期待される。

＜問題点・改善すべき点＞

●SiC 材料の特性を顕在化させた高効率・高密度インバータユニットが適用可能な産業分野として産業用モータ、ハイブリッドカー等が挙げられているが、それぞれの適用分野の性格にもよるが、Si パワーデバイスとの競合を考える上で低コスト化は今後必須である。システムという最終段階での SiC 半導体の優位性が立証された現在、さらなる性能向上はもちろん必要であるが、デバイスとしての信頼性を保持しつつ低コスト化を実現するための開発が重要となる。本事業内で使用されたプロセスのみで実現できるかは疑問であり、抽出された要素技術が抱える課題を解決するための新たな革新的技術開発が知財戦略の構築とともに必要となろう。また、低コスト化を阻む最大の要因として基板ウェハの価格が挙げられるが、それは過去からも言われ続けた内容であり、ウェハコスト

の低減化には市場自体の拡大化を前提とした事業化戦略が必要となる。

●実用化に際しては、Si に比べてコスト（価格）が過渡に高騰しないように開発しなければならないことは言うまでも無いが、市場（使用者）の視点で見ると、安定確実なデバイス供給も重要な実用化の指標である。この見通しについても具体的な報告をお願いしたい。また、今後の開発は、更なる歩留まりや信頼性の向上を目指したウェハやデバイスの高度化研究を進める一方、この分野への人的物的なリソースの継続的な供給体制が確保・整備できるよう配慮して推進していただきたい。

●実際の使用状況下における信頼性の評価、例えば、ダイナミックな使用環境を考慮した評価実験を行う必要がある。

●こういった大きなプロジェクトにもっと博士課程学生やポスドクの方々の参加するのが好ましいし、彼らのプロジェクト後のしかるべきポジションの確保が課題。

●実用化までに残された課題の整理・検討をさらに行なって欲しい。

●実用化の見通しは妥当であるが、そのより明確化が望まれる。

＜その他の意見＞

・今回、インバータを取り上げ、検討を実施している。他のシステムも含めた、エネルギー利用システム全体への波及効果等も議論すると良い。

・本プロジェクトのスコープに直接入るものではないが、ウェハの安定供給（特に国内）を確保できるよう、今後、検討していただきたい。

・本事業により、得られた知見が幅広く活用され、パワーエレクトロニクス機器として、できるだけ速やかな実現化・実用化が重要である。

## ２．個別テーマに関するコメント

### ２．１高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発

### ２．１．１インバータ大容量化基盤技術の研究及びインバータ信頼性向上基盤技術の研究

（１）成果に関する評価

| |
|---|
| 5mm 角、100A 級のショットキーダイオードの実証、耐圧歩留まりを低下させる欠陥に関する系統的な研究、デバイス（特に酸化膜）の信頼性向上に向けた指針の提示など、多くの世界水準の成果が達成されている。さらに、基板欠陥と信頼性の関係を定量的に明確にし、基板に求められる物性指標を明らかにしたことも、基板メーカーに対しての仕様要請の点で今後の展開に有益である。 |

＜肯定的意見＞

○SiC パワーデバイス化への最大のボトルネックと言われ続けた結晶欠陥に対して、デバイス実証を含む総合的かつ複合的見地から欠陥評価技術に取り組み、地道な研究開発から多くの知見を短期間でまとめあげ、キラー欠陥の同定を行い得たのは、非常に大きな成果として評価できる。

○リーク電流と転位密度など、キラー欠陥の本質的性質を明確にし、SBD や PiN ダイオード、大容量 MOSFET などを実現した点は SiC デバイス技術を著しく前進させた。また、酸化膜の信頼性が 30 年以上であるなどの具体的検討結果が得られていることが高く評価できる。

○5mm□チップでの性能目標を定量的に挙げ、それを達成した成果は評価できる。さらに、基板欠陥と信頼性の関係を定量的に明確にし、基板に求められる物性指標を明らかにしたことも、基板メーカーに対しての仕様要請の点で今後の展開に有益である。

○パワーデバイスはインバータの大容量化･高信頼度化を実現する際の中心的要素であり、SiC ウェハの欠陥･不良発生の解析と評価に関する本プロジェクトの成果は今後「高効率･高密度インバータ革新的高度化」を進めるに当たり大きく寄与する。

○着実に成果が出ている。信頼性向上に関しても、着実に現象が解明され実用化へ繋がる成果である。

○5mm□、100A 級のショットキーダイオードの実証、耐圧歩留まりを低下させる欠陥に関する系統的な研究、デバイス（特に酸化膜）の信頼性向上に向けた指針の提示など、多くの世界水準の成果が達成されている。

＜問題点・改善すべき点＞

●基板欠陥や酸化膜破壊の起因の解明と解決がノウハウに依存しているのはやむを得ないが、装置メーカーや多くの他社メーカーに普遍的な高品位膜・界面作成指針が提示できるような、科学的根拠を示して欲しい。

●Al イオン注入における点欠陥の拡散による接合リークの可能性が報告されたが、さらに踏み込んだ、欠陥準位の解析等が必要ではないか。

＜その他の意見＞

・独自性と知的財産の確保のため、ノウハウで秘匿するのはやむを得ないが、日本独自の技術のより広い展開に向け、なんらかの技術公開・活用システムを考案して欲しい。

・新たに判明・解決した事象が何かを整理して示すと成果が分かりやすい。

（２）実用化に関する評価

| |
|---|
| エピ欠陥制御の重要性、欠陥の表面形状が重要であることが明確に示された。実用化に必要なパワー密度の制御と信頼性を実現した成果は大である。また、基板に要求される仕様を明確にした点も、今後の実用化に対する指標として評価できる。 |

<肯定的意見>

○基板の特性がデバイスに与え得る影響を総合的に評価する手法が確立されたことから、今後のデバイス実用化に対して、一つのブラックボックスが開放されたことを意味する。その意味で、効率的な実用化展開が今後、可能となり、SiC パワーデバイス関連事業の加速化が進むものとして評価される。

○具体的素子の実態が報告されたこと、それらデバイスの信頼性が予見できたことで、実用化へ進む工業的強い動機（投資への安心感）が得られたと考えられる。

○実用化に必要なパワー密度の制御と信頼性を実現した成果は大である。また、基板に要求される仕様を明確にした点も、今後の実用化に対する指標として評価できる。

○十分に実用化に繋がる成果が出ており、実用化の見通しは明るいと感ずる。

○エピ欠陥制御の重要性、欠陥の表面形状が重要であることが明確に示された。今後のエピ品質向上へ有用な情報が得られたと考えられる。

○デバイスの大容量化、信頼性向上は、SiC デバイス、インバータ実用化に向けた最重要課題であり、本プロジェクト（成果）の貢献は大きい。

<問題点・改善すべき点>

●実使用条件下における、素子の信頼性評価が今後の実用化には必須である。また素子の歩留まり向上に対してプロセスとの関連を物性に戻って検討することが望ましい。

●エピ成長へどのように成果を反映させるのかの見通しが欲しい。

（３）今後に対する提言

SiC デバイスによる省エネ効果、小形化効果が明らかとなったことにより、国際的競争に曝される技術分野となったので、デバイスの高性能化と市場への具体的応用例と効果の提示および低コスト化のための技術開発が今後更に重要となる。ウェハ欠陥とデバイス特性の相関に関する研究を継続し、国際標準となるデータベースを構築することが重要である。更には、エピ技術への取り組み方の検討を希望する。

今後、装置メーカーや多くの他社メーカーに普遍的な高品位膜・界面作成指針が提示できる科学的根拠を示すことができれば、より研究が加速する可能性がある。Al イオン注入における点欠陥の拡散による接合リークの可能性が報告されたが、さらに踏み込んだ、欠陥準位の解析等が重要ではないかと考える。

実使用条件下における、素子の信頼性評価が今後の実用化には必須である。また素子の歩留まり向上に対してプロセスとの関連を物性に戻って検討することを期待する。

＜今後に対する提言＞

・本来、SiC デバイスは Si デバイスで醸成された利用領域を拡大するものであると考えられるため、実用化の見通しとしては、SiC 化によってメリットが享受できる領域から順次ごく自然に適用されるものとして比較的楽観視できる。ただし、SiC デバイスによる省エネ効果、小形化効果が明らかとなったことにより、国際的競争に曝される技術分野となったことも確かであり、弛まない技術開発（デバイスの高性能化）と市場への具体的アピール（具体的応用例と効果の提示）および低コスト化のための技術開発が今後更に重要となる。
・（上記、改善すべき点と同じ。）
・我が国の SiC パワーデバイスを用いた電力変換器の高性能化は諸外国に対して遅れ気味で急務である。この電力変換器の高性能化には種々の技術要素が絡んでおり、国内の多くの研究グループが手がける必要がある。こういった国内研究グループへの SiC パワーデバイスの流通を期待したい。
・エピ技術への取り組み方を検討していただければと思います。
・ウェハ欠陥とデバイス特性の相関に関する研究を継続し、国際標準となるデータベースを構築していただきたい。

２．１．２インバータ高パワー密度化基盤技術の研究

（１）成果に関する評価

| |
|---|
| 50W/cm$^3$ という定量的目標に対し、その実現に向け、シミュレーションによる設計と素子試作両面から計画を推進し、その見通しを明確にした点が評価できる。また、デバイスの耐熱要素を逐一改善して高温動作を実証すると共に、高温実装の基盤技術も提示した成果は世界水準で高く評価される。<br>実装における課題は、パワーサイクル信頼性と考えられる。実用化を睨んではこの検討が必要と考える。 |

＜肯定的意見＞

○低オン抵抗、変換器、高温動作、電磁妨害に着目して研究を推進し、夫々で注目すべき成果を創出している。特に、FET の実現では酸化膜不良の改善で大面積化を実現し、回路設計では統合回路シミュレータを駆使するなど、極めて効率的な研究推進が成されたことは、現代の研究開発の協調体制の模範を示したものといえる。

○50W/cm$^3$ という定量的目標に対し、その実現に向け、シミュレーションによる設計と素子試作両面から計画を推進し、その見通しを明確にした点が評価できる。

○本研究開発の成果からインバータ高パワー密度化を実現する上での重要な技術要素が良く分かり、それらが良く検討されている。特に、変換器損失統合設計シミュレータの開発は、変換回路技術面で、今後高パワー密度化を実現していく上で貴重な成果となる。

○低オン抵抗 SiC-MOSFET が開発され、50W/cm$^3$ を実現するための指標が明確に示された。

○50W/cm$^3$ という極めて高いパワー密度の達成に向けて、独自の統合設計シミュレータを開発し、そのガイドラインを提示したことは重要な成果である。また、デバイスの耐熱要素を逐一改善して高温動作を実証すると共に、高温実装の基盤技術も提示した成果は世界水準で高く評価される。

○高パワー密度化技術開発のためにソフト・ハード両面からアプローチし、50W/cm$^3$ 実現のための課題を明らかにしている。さらに将来のパワーエレクトロニクスシステムを踏まえて、総合的な視点から検討ができている。

＜問題点・改善すべき点＞

●デバイス化プロセス技術の中の要素技術として、いまだ解決法を見出すことが困難な課題が存在する（例、イオン注入後の高温活性化アニール）。解決法として提示された方法（例、カーボンキャップ層）は、生産技術としては未成熟

なままであり、今後の研究開発が必要な分野である。典型的な Si プロセスから見ると、困難さを見出し得ない分野であるが、SiC プロセスでは単純なプロセスにおいても装置インフラすら存在せず、地道な開発が今後とも必要であることを積極的に開示すべきである。SiC パワーデバイスへの社会的期待が高まる中で、プロセスの上流側からの技術課題を論理的に克服するだけで最終製品に結びつくとの誤解を社会に与えないためにも、積極的な課題の提示が求められる。システムレベルでの優位性が示された現在、再度、基礎的な研究開発にも焦点を当て、プロセス制御に関わる自由度を拡張することも重要ではなかろうか。

●実現されている SiC 素子そのものの性能と周辺システム(実装･回路構成など)との関係をシミュレーションだけでなく実際のシステム構成として見通しを示すことが望まれる。

●インバータ高パワー密度化を実現する上では、パッシブコンポーネントの高パワー密度化やヒートシンクの最適設計（熱設計）も肝要であるが、こういった面の成果も欲しかった。

●実装における課題は、パワーサイクル信頼性と考えられる。実用化を睨んではこの検討が必要と考えられる。

＜その他の意見＞

・知財の確立への積極的な取り組みが必要であったと考えられる。

・変換器の設計ツールは世界の種々の研究グループで開発が競われており、実利用しながらその性能を改善している。本プロジェクトで開発した変換器損失統合設計シミュレータを広く利用してもらってさらなる性能･能力向上を試行してはどうだろうか？

（２）実用化に関する評価

| |
|---|
| 50W/cm³ の実現可能性とそれに要求される素子仕様を定量的に示した点は高く評価できる。設計技術として、初期検討に十分使用可能なレベルに仕上がっている。電力変換密度 50W/cm³ という究極の技術トレンドが具体的に示され、高パワー密度化技術の実現のための条件が明らかとなった。今後の実用化のポジションが明確になったことで、実用化が着実に進展するものと期待したい。 |

＜肯定的意見＞

○多くの技術的解決手法と課題が具体的に示され、また材料からシステムに至るまでの道程の中での個々のプロセスの重要性が客観的に示されたことから、今後は一つの分野に特化した重点的な課題解決に取り組むことへの正当性が与えられたとも位置付けられる。

○電力変換密度 50W/cm³ という究極の技術トレンドが具体的に示されたことで、今後各研究開発シーンでこの目標が掲げられるものと考えられる。これは、本プロジェクトの大きな成果と考えられる。すなわち、今後の実用化のポジションが明確になったことで、実用化が着実に進展するものと期待される。

○50W/cm³ の実現可能性とそれに要求される素子仕様を定量的に示した点は高く評価できる。

○本プロジェクトの成果をもって即実用に供するとは考えにくいが、この分野における我が国初の体系的研究開発であるし、その成果は将来の実用化に大いに貢献する。

○設計技術として、初期検討に十分使用可能なレベルに仕上がっている。特にデバイスモデルは有用である。

○高パワー密度変換機、高温動作は Si では不可能な武器となる。SiC 実用化に向けた大きな成果と考えられる。

○高パワー密度化技術の実現のための条件が明らかとなった。

＜問題点・改善すべき点＞

●期間･要員･予算に制限があったであろうが、実製品レベルでの高密度化にとって重要なパッシブ部品やヒートシンクの最適設計に関する項目が入っていなかったのが残念である。今後に期待したい。

（３）今後に対する提言

さまざまな変換回路に利用するためのノイズ解析、インダクタンス相互干渉、高速スイッチングにおける電流分布等をさらに取り入れ、応用範囲の広い技術へ展開することを期待する。インバータ以外の電力変換器については、フィルタやトランスなどのパッシブな素子による、電力変換密度向上の阻害要因がある。SiC の応用がこれらパッシブな素子の小形化に対しても有効であることが示されれば、実用化が更に加速できるものと考える。

インバータをより高密度化するためには、パブリックコメントにもあったように、受動素子も含めた装置全体の最適化が必要であり、これらの技術開発も望む。

＜今後に対する提言＞

・SiC のプロセス技術・実装技術には、まだまだ克服すべき基礎的課題が存在する。しかし、本事業の成果により、目標感をもった技術開発が今後、行える環境が整ったとも言える。これは、SiC のデバイス開発分野にとって非常に大きな財産である。今後は、実用化を見越した低コスト化を実現するための技術開発が必要となろう。

・本プロジェクトが対象としているインバータ以外の電力変換器については、フィルタやトランスなどのパッシブな素子による、電力変換密度向上の阻害要因がある。SiC の応用がこれらパッシブな素子の小形化に対しても有効であることが示されれば、実用化が更に加速できるものと考えられる。

・変換器の高密度化では、スイッチングデバイス部の評価のみならず、熱解析によるヒートシンクの最適化（ヒートシンクの小型軽量化）やフィルタ L･C などのパッシブコンポーネントの最適化、および EMI 評価も重要であり、これらが揃わないと十分には高密度化が図れないと考えられる。そういった面を考慮した今後の継続的活動が必要であろう。

・さまざまな変換回路に利用するためのノイズ解析、インダクタンス相互干渉、高速スイッチングにおける電流分布等をさらに取り入れ、応用範囲の広い技術へ展開することを期待する。

・高温動作はSiC特有のメリットであり、実装を含めた見極めが大変重要となる。今後の継続的な研究開発を是非ともお願いしたい。独自開発したシミュレータの公開も検討いただきたい。

・今後、高パワー密度化技術の実現条件の具現化の過程のより明確化が望まれる。また、インバータをより高密度化するためには、パブリックコメントにもあったように、受動素子も含めた装置全体の最適化が必要であり、これらの技術開発も望まれる。

## ２．２　高効率・高密度インバータユニット技術開発

### （１）成果に関する評価

| |
|---|
| 大容量 SiC MOSFET、ショットキーダイオードの開発に加えて、特化した回路設計と動作条件の検討、周辺部品の小型化の検討等の技術を集約して、14kVA－11kW のユニットで 70%の低損失化、10W/cm³ の電力密度を実現し具体的に提示したことは目を見張る成果であり、産業界へも極めて高いインパクトとして歓迎されることは確実である。<br>構成素子に必要とされる仕様を明確にし、システム部品としてのバラつき低減を達成するプロセスの確立は今後の展開に重要である。<br>今後、素子の歩留まりだけでなく、システムとしての信頼性を明らかにする解析、評価をすすめて欲しい。 |

＜肯定的意見＞

○SiC パワーデバイスの価値を社会に提示するという目的に対しては、多大なる貢献を成し得たものとして評価できる。

○14kVA－11kW のユニットで 70%の低損失化、10W/cm³ の電力密度を実現し具体的に提示したことは目を見張る成果であり、産業界へも極めて高いインパクトとして歓迎されることは確実である。

○低損失の 14kVA インバータユニット実現という定量的目標を挙げ、その試作に成功したことは高く評価できる。構成素子に必要とされる仕様を明確にし、システム部品としてのバラつき低減を達成するプロセスの確立は今後の展開に重要である。

○従来の Si パワーデバイス式のインバータに比べて、出力 14kVA の試作機で損失を 30%に低減できた点はすばらしい。

○SiC を用いたインバータを試作し、実際に変換損失が大幅に減少する
ことを示した意義は大きい。

○大容量 SiC MOSFET、ショットキーダイオードの開発に加えて、特化した回路設計と動作条件の検討、周辺部品の小型化の検討等の技術を集約して、大容量インバータユニットを作製し、Si インバータユニットと比較して大幅な小型化と低損失化を実証した成果は特筆すべきである。大きな２つの受賞も当然と考えられる。

○本事業で目指した高効率・高密度インバータの開発目標に対して、14kVA の SiC インバータユニットの試作により電力損失の低減とキャリア周波数の高周波化が可能であることを示し、成果を達成している。

<問題点・改善すべき点>

●報告書の体裁の問題ではあるが、体積比較の対象である従来のSi-IGBTによるインバータモジュールの体積が放熱器で決まる最小値あることを明言して頂きたかった。比較しているIGBTは個別にパッケージされたディスクリート部品であり、SiCはベアチップによるハイブリッドモジュールである点に体積比較上の不公平感がある。

●素子の歩留まりだけでなく、システムとしての信頼性を明らかにする解析、評価をすすめて欲しい。

●キャリア周波数について：現状の『～10kHz』は理解できるが、これだけの規模の技術開発でターゲットを『>15kHz』としたのは低すぎたではないであろうか。試作機では30kHzとしているが、10kW･30kHz程度は海外で実現しているレベルではないであろうか？

●キャリア周波数の高周波化に関し、コンバータでの議論が主となっている。
目標であるインバータでの議論をもう少し展開して欲しい。

<その他の意見>

・実証値（最終目標値）への到達は、最終成果物が実動している状況を見ると圧倒的な説得力をもつものであるが、SiC物性由来の優位性が、現在までの状況の中でどの程度、顕在化しているのか（どの程度のマージンがあると考えているのか)、何らかの言及が望まれる。

・変換器の効率と密度（＝体積／容量）はトレード･オフの関係にある。SiCパワーデバイスを用いてそのトレード･オフを改善しても改善されたレベルでトレード･オフは残る。「効率重視」（密度はある程度犠牲)、あるいは「密度重視」（効率はある程度犠牲）など、狙いを振れる設計･製作を可能とする技術の育成も今後必要ではなかろうか？

　また、高キャリア周波数化によって、例えばフィルタインダクタの小型化が実現可能である点が報告書で言及されているが、インダクタを小型化すると損失密度が上がり高温化するので、単純に『高キャリア周波数化＝フィルタインダクタ小型化』とは行かないのでは？

（２）実用化に関する評価

| |
|---|
| 実用に近いインバータでの性能評価を実施したことは、SiC デバイス開発の重要性を示す成果である。動力用インバータへの適用効果が極めて大きいことが示されたので、実用化に向けた研究開発が期待される。特に、本プロジェクトで開発使用されたインバータ統合設計シミュレータにより、これを用いた実用化研究が可能であることは、開発期間と稼動を短縮する技術として注目に値する。 |

＜肯定的意見＞

○動力用インバータへの適用効果が極めて大きいことが示されたので、実用化に向けた詰めの研究開発が進展すると期待される。特に、本プロジェクトで開発使用されたインバータ統合設計シミュレータの存在により、これを用いた実用化研究が可能であることは、開発期間と稼動を最小化する技術として注目に値する。

○低損失 14kVA インバータユニットの試作実現は大きな成果である。また、30kHz の高キャリア周波数化の動作実証は今後の展開に大きく資する。

○試作機は実用器に近い出来で、実用化の見通しは明るいと感じた。

○実用に近いインバータでの性能評価を実施したことは、SiC デバイス開発の重要性を示す成果である。

○実用化に有効なアピールポイントを実証する優れた成果が挙げられている。

○目標とした高効率・高密度インバータが試作され、その実用化のための見通しがたてられている。

＜問題点・改善すべき点＞

●今後の実用化展開を促す上での最大の課題が SiC ウェハ価格であるとの認識である。Si パワーデバイスの価格優位性を揺るがす総合的な事業戦略が構築されない限り、実際の事業化は困難を極めると考えられる。

●素子やシステムとしての歩留まりと現在の Si デバイスを用いたシステムとの優位点をより明確にする実用化指針を示すことが望まれる。

●高キャリア周波数のインバータを実用に供した場合の問題点（EMI，インダクタや負荷モータの損失）の評価も必要ではなかったか？

●今後の実用化に関する課題が、明確には述べられていない。汎用モータのインバータ化に対し、SiC がどのように貢献するのか、素子の低損失化のみで可能なのか、道筋を示す必要がある。

●実用化の見通しは妥当であるが、そのより明確化が望まれる。

（３）今後に対する提言

さらなる大容量化を進めると共に、高周波化の限界の見極めを行い、多くの電力変換機器で SiC の優位性を示して行ってほしい。具体的な製品で示し、速やかな製品技術への移行が重要である。

高温動作や温度サイクルに関する信頼性の評価など､実用化開発個別の問題がまだ多く存在するものと考えられる。これら問題を丹念に克服し一般化することによってはじめて、SiC デバイス技術が Si デバイス技術に比肩した評価が得られるものと考えられる。今後も、国際競争力を維持向上するためにも、更なる低損失化や 50W/ $cm^3$ を目指していただきたい。

実際の実用化には、ウェハ価格のみではなく、デバイス化のための要素技術、また実装技術にも、いまだ多くの課題が残されており、それらの課題の社会的な共有こそが、最終的な市場拡大につながり、低コスト化への駆動力になる。

小型化や高周波化等今回得られた成果を実用化へ繋げるため、例えば、汎用モータのインバータ化が､SiC 素子の低損失化のみで可能なのか等､道筋を示すことが重要と考える。素子やシステムとしての歩留まりと現在の Si デバイスを用いたシステムとの優位点を、より明確にするなど実用化指針を示すことを望みたい。今後の実用化での最大の課題は SiC ウェハ価格である。Si パワーデバイスの価格優位性を揺るがす総合的な事業戦略が構築されない限り、Si パワーデバイスにとって替わることは困難を極めると考えられる。

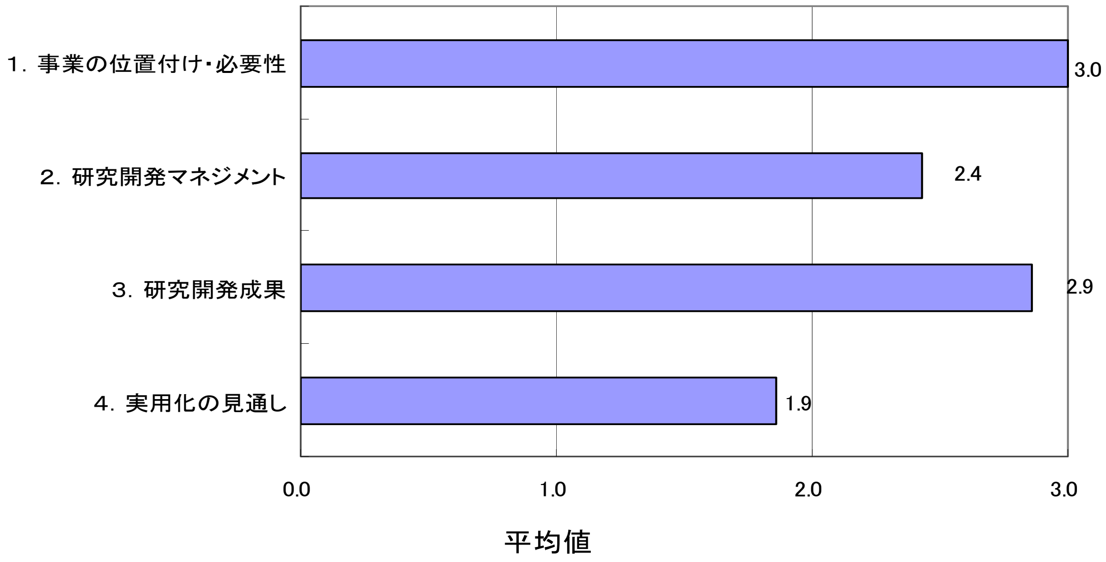
＜今後に対する提言＞

・今後の実用化展開を促す上での最大の課題がウェハ価格であるとの認識である。市場が拡大しない限り、ウェハの低コスト化は困難であり、米国 CREE 社と比肩し得る国内メーカーが育ちつつある現在、すべての責任がその価格に転嫁される状況を打破することが必要と考える。実際の実用化には、ウェハ価格のみではなく、デバイス化のための要素技術、また実装技術にも、いまだ多くの課題が残されており、それらの課題の社会的な共有こそが、最終的な市場拡大につながり、低コスト化への駆動力になるとも期待される。
・一例として高温動作や温度サイクルに関する信頼性の評価など、今後行なわれるべき実用化開発個別の問題がまだ多く検討課題として存在するものと考えられる。これら問題を丹念に克服し一般化することによってはじめて、SiC デバイス技術が Si デバイス技術に比肩した評価が得られるものと考えられる。今後も、国際競争力を維持向上するためにも、更なる低損失化や 50W/$cm^3$ を目指した技術開発を怠らず進めていただきたい。
･【評価委員コメント欄】の＜その他の意見＞で述べた通り､今後はパッシブ部品，ヒートシンク，EMI についての検討が必要と感ずる。

・多くの電力変換機器で SiC の優位性を示して行ってほしい。具体的な製品で示すことが重要と考えており、今後も積極的な展開を期待する。
・さらなる大容量化を進めると共に、高周波化の限界の見極めを行っていただきたい。
・本事業により得られたインバータ基盤技術が、できるだけ速やかな製品技術への移行が重要である。

３．評点結果

３．１　プロジェクト全体




| 評価項目 | 平均値 | 素点（注） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| １．事業の位置付け・必要性について | 3.0 | A | A | A | A | A | A | A |
| ２．研究開発マネジメントについて | 2.4 | B | A | B | B | B | A | A |
| ３．研究開発成果について | 2.9 | A | A | A | B | A | A | A |
| ４．実用化の見通しについて | 1.9 | B | B | B | B | C | B | B |

（注）A=3，B=2，C=1，D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

(1)事業の位置付け・必要性について

・非常に重要　→A
・重要　→B
・概ね妥当　→C
・妥当性がない、又は失われた　→D

(2)研究開発マネジメントについて

・非常によい　→A
・よい　→B
・概ね適切　→C
・適切とはいえない　→D

(3)研究開発成果について

・非常によい　→A
・よい　→B
・概ね妥当　→C
・妥当とはいえない　→D

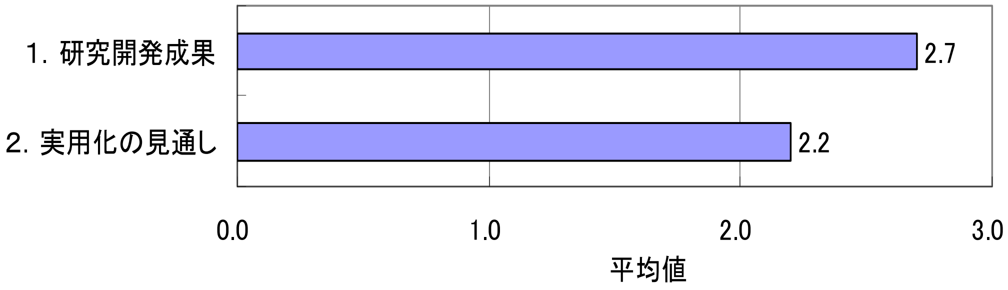
(4)実用化の見通しについて

・明確　→A
・妥当　→B
・概ね妥当であるが、課題あり　→C
・見通しが不明　→D

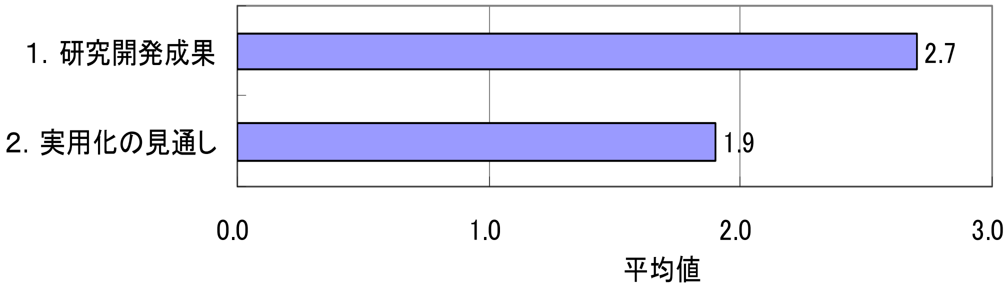
## ３．２　個別テーマ

### ３．２．１高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発

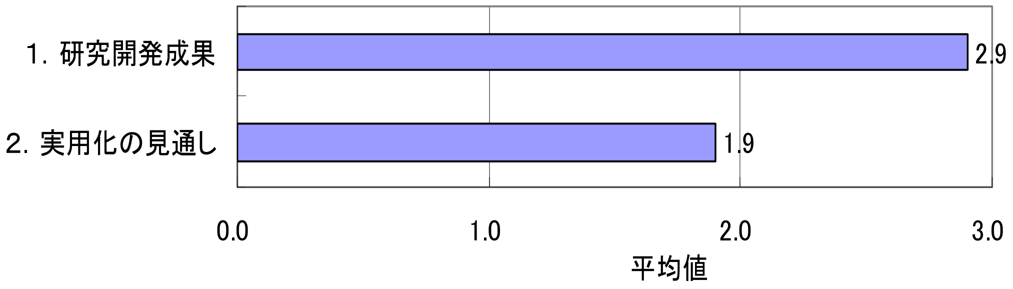
（１）高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発及びインバータ信頼装置技術およびプロセス技術の開発




（２）インバータ高パワー密度化基盤技術の研究




### ２．１．２高効率・高密度インバータユニット技術開発



３．２．１高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発

| 個別テーマ名と評価項目 | | 平均値 | 素点（注） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| （１）インバータ大容量化基盤技術の研究及びインバータ信頼性向上基盤技術の研究 | | | | | | | | | |
| | １．研究開発成果 | 2.7 | A | A | A | B | B | A | − |
| | ２．実用化の見通し | 2.2 | A | B | B | B | B | B | − |
| （２）インバータ高パワー密度化基盤技術の研究 | | | | | | | | | |
| | １．研究開発成果 | 2.7 | B | A | A | B | A | A | A |
| | ２．実用化の見通し | 1.9 | B | B | B | C | B | B | B |

３．２．２高効率・高密度インバータユニット技術開発

| 個別テーマ名と評価項目 | | 平均値 | 素点（注） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| （１）高効率・高密度インバータユニット技術開発 | | | | | | | | | |
| | １．研究開発成果 | 2.9 | A | A | A | B | A | A | A |
| | ２．実用化の見通し | 1.9 | B | B | B | A | C | A | B |

〈判定基準〉

（1)研究開発成果について
- ・非常によい →A
- ・よい →B
- ・概ね適切 →C
- ・適切とはいえない →D

（2)実用化の見通しについて
- ・明確 →A
- ・妥当 →B
- ・概ね妥当であるが、課題あり →C
- ・見通しが不明 →D

# 第２章　　評価対象プロジェクト

１．事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

# 「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発プロジェクト」

# 事業原簿

**公開版**

| 担当部 | 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構<br>電子・情報技術開発部 |
|---|---|

― 目次 ―

概 要
プロジェクト基本計画
プログラム基本計画
プロジェクト用語集

Ⅰ．事業の位置付け・必要性について
1．ＮＥＤＯの関与の必要性・制度への適合性･････････････････････････1
1.1 ＮＥＤＯが関与することの意義･･････････････････････････1
1.2 実施の効果 ･････････････････････････ 2
1.3 情勢変化への対応 ･････････････････････････ 5
1.4 評価に関する事項 ･････････････････････････ 5
2．事業の背景・目的・位置づけ ･････････････････････････ 5

Ⅱ．研究開発マネジメントについて
1．事業の目標 ･････････････････････････ 6
2．事業の計画内容 ･････････････････････････ 8
2.1 研究開発の内容 ･････････････････････････ 8
2.2 研究開発の実施体制 ･････････････････････････14
2.3 研究開発の運営管理 ･････････････････････････24
3．情勢変化への対応 ･････････････････････････26
4．評価に関する事項 ･････････････････････････27

Ⅲ．研究開発成果について
1．事業全体の成果 ･････････････････････････27
2．研究開発項目毎の成果 ･････････････････････････29
2.1 高効率・高密度インバータユニット技術開発 ･･･････････････････29
2.2 高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発 ･･･････････30
(1)インバータ大容量化技術 ･････････････････････････30
(2)インバータ信頼性向上基盤技術 ･････････････････････････32
(3)インバータ高パワー密度化基盤技術 ･････････････････････････34
3.成果の水準と目標の達成度 ･････････････････････････35
４．研究発表・講演・特許・その他の公表 ･････････････････････････44
Ⅳ．実用化、事業化の見通しについて ･････････････････････････45
Ⅴ．事前評価書とパブリックコメント募集の結果 ･････････････････････････48
参考資料：「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」成果参考資料

# 概　要

| 作成日 | 平成 21 年 8 月 25 日 |
|---|---|

| | | | |
|---|---|---|---|
| プログラム（又は施策）名 | ＩＴイノベーションプログラム<br>エネルギーイノベーションプログラム | | |
| プロジェクト名 | パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発 | プロジェクト番号 | Ｐ０６０１９ |
| 担当推進部/担当者 | 電子・情報技術開発部　秋山純一 | | |
| ０．事業の概要 | 低損失・高密度パワーエレクトロニクス機器を実用化するためには、SiC スイッチング素子技術を用いて、低損失・高密度インバータ技術開発を行うことが必要である。すなわち具体的な適用製品を想定して、従来の Si スイッチング素子を高性能 SiC スイッチング素子に置き換えてインバータに用いるための回路設計技術、ノイズ対策や熱設計などの SiC スイッチング素子実装に伴う課題等を解決していく必要がある。一方、革新的な超低損失・高密度インバータを実現するために、SiC スイッチング素子の大容量化・信頼性向上・低損失化等の SiC 材料のポテンシャルを最大限活用した高度化が求められる。これらの技術開発のためには素子特性評価と SiC ウェハ評価を多面的に結びつけ、SiC 単結晶ウェハおよびエピタキシャル製膜技術へフィードバックすることが不可欠である。さらに、高度化 SiC スイッチング素子の性能を最大限活用したインバータ高パワー密度化に関わる設計技術・高速制御技術・高温実装技術等の基盤技術開発が必要である。本プロジェクトでは、これらの要請を具現化して、SiC スイッチング素子を用いたパワーエレクトロニクスインバータ基盤技術を開発した。 | | |
| ０．事業の位置付け・必要性について | 情報家電の普及や通信需要の拡大に対処する電気エネルギーの高効率利用の実現、及びハイブリッド自動車や産業用の様々なモータ制御、家電製品の電源制御など、我が国の重要産業の国際競争力強化と省エネルギーを図るためには、その基盤となるパワーエレクトロニクスの研究開発が必要である。また、経済産業省が発表した新産業創造戦略（平成 17 年 5 月）において、我が国の産業競争力強化のために注力すべき分野として、環境・エネルギー機器が挙げられており、パワーエレクトロニクス機器には、一層の低消費電力化・小型化が求められている。本プロジェクトでは、自動車・家電製品等の低消費電力化実現に不可欠な炭化ケイ素（SiC）等を用いたパワーエレクトロニクスインバータ基盤技術を平成 20 年度までに確立し、我が国の関連産業の国際競争力強化と省エネルギーに資することを目的として IT イノベーションプログラム及びエネルギーイノベーションプログラムの一環として実施する。 | | |

Ⅱ．研究開発マネジメントについて

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 事業の目標 | 平成 20 年度までに、具体的な製品応用を想定した SiC を用いた低損失インバータユニットを試作し、電力変換損失を同一定格の Si インバータユニットの 30%以下に低減する。また、SiC 材料のポテンシャルを最大限活用した革新的な超低損失・高密度インバータを実現するために、SiC スイッチング素子の大容量化・信頼性向上・低損失化等の性能高度化や、インバータ設計・高速制御・高温実装等に関わる基盤技術を確立する。 | | | | |
| 事業の計画内容 | 主な実施事項 | H18fy | H19fy | H20fy | |
| | ①高効率・高密度インバータユニット技術開発 | ──── | ──── | ──→ | |
| | ②高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発 | ──── | ──── | ──→ | |
| 開発予算（会計・勘 | 会計・勘定 | H18fy | H19fy | H20fy | 総額 |
| | 一般会計 | | | | |
| | 特別会計（高度化） | 2,067 | 1,089 | 888 | 4,044 |
| | 総予算額 | 2,067 | 1,089 | 888 | 4,044 |

| | | |
|---|---|---|
| 開発体制 | 経産省担当原課 | 商務情報政策局　情報通信機器課 |
| | プロジェクトリーダー | （独）産業技術総合研究所　パワーエレクトロニクス研究センター<br>研究センター長　荒井　和雄（現在、イノベーション推進室　技術顧問） |
| | 委託先 | 三菱電機 株式会社、　独立行政法人 産業技術総合研究所、　財団法人 新機能素子研究開発協会 |

| | | |
|---|---|---|
| | 情勢変化への対応 | 3年間という短期のプロジェクトで目標を達成するため、必要な設備を早期に整備するためH18年度においては、H19年度予算の前倒し使用が認められ、実行した。また、世界最小のオン抵抗値を実現したことで、基盤技術開発の加速追加資金が335百万円投入された。<br>H19年度、H20年度の予算は予定されていたより減額されたが、大口径ウェハの適用、高キャリヤ周波数化を図るための加速をH19年度に240百万円、歩留り向上に繋がるプロセス要素技術の開発の加速としてH20年度には85百万円の加速資金が投入された。 |
| Ⅲ. 研究開発成果について | | 【事業全体】<br>オールSiCインバータの設計、試作,実証では、14ｋVA（11ｋW出力）/400Vインバータユニット（体積1.1L）のユニットで損失の70%低減、パワー密度10W/$cm^3$ を達成。基盤技術としてSiCウェハの結晶転位欠陥のデバイス性能への影響については、現行の高品質基板は適用可能でむしろエピ膜形成を含めたプロセス起因欠陥がキラー欠陥であることが判明した。また、インバータの高パワー密度、高温使用の可能性について見極めることのできる技術が確立された。<br>【個別テーマ】<br><u>①高効率・高密度インバータユニット技術開発</u><br>・14kVA (11kW)のSiCインバータユニットを試作し、Si-IGBTモジュールに比べ損失70%減を実証し、最終目標を達成した。パワー密度10W/$cm^3$、高キャリア周波数化ではインバータユニットで30kHzを達成した。４インチウエハを用いたSBD試作を行い、ウエハ品質と合わせて、変換器実用化の見通しを確実にした。<br><u>② 高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発</u><br>（１）インバータ大容量化技術<br>・結晶欠陥と素子破壊箇所の対応付けを行い、三角欠陥等のエピ欠陥がキラー欠陥であることを明らかにした。また、絶縁破壊箇所特定素子の試作により､MOS型電界効果トランジスタの耐圧不良が接合型電界効果トランジスタ領域上の酸化膜の破壊によること等を突き止めた。更に、活性化熱処理プロセスの工夫でSiC基板表面荒れを抑制することで歩留まりを向上させる技術を開発し､5mm角の素子試作に適用してショットキーバリアダイオード等で高い歩留りを得た。これらの結果から、5mm角､100A級素子の実現に必要な条件を明らかにした。<br>（２）インバータ信頼性向上基盤技術<br>・5mm角までのMOS構造の信頼性寿命測定、放射光Ｘ線トポグラフィー等によるキラー欠陥の同定を進めて、数種のエピ欠陥がキラー欠陥として働き、絶縁破壊電荷を減少させていることを明確にした。貫通螺旋転位欠陥は破壊確率を高くするが、市販基板レベルの貫通螺旋転位欠陥密度では、実使用上必要とされる信頼性寿命30年は保証できるとの見通しを得た。また、ドライ酸化とウエット酸化／N20酸化の組み合わせにより、高チャネル移動度と高信頼性を両立できる酸化膜形成技術の開発に成功した。<br>（３）インバータ高パワー密度化基盤技術<br>低オン抵抗素子試作と損失統合設計シミュレーションにより50W/$cm^3$ の高出力パワー密度を実現できる条件を明らかにした。重要な条件である高温環境動作のための電極形成技術等に関する分析を進め、250℃の環境下で1000時間を超える高温保持試験を行い、良好な接合特性を維持できることを確認した。 |
| | 投稿論文 | 40件　「査読付き」39件、「その他」1件、口頭発表：80件（国際会議：33件） |
| | 特　　許 | 「出願済」のべ14件、「登録」0件、「実施」0件（うち国際出願のべ2国・件） |
| Ⅳ. 実用化、事業化の見通しについて | | 本プロジェクトによって工業用モータ等に応用する汎用インバータの大幅な低損失化等の性能実証ができ、また4インチウェハの品質レベル向上の確認により、実用化、事業化に向けて展開することができる。　基盤技術研究開発の成果活用により、ウェハ品質向上、デバイス製造プロセスへの要素技術の展開による歩留り向上、機器の設計条件の決定、システムメーカの製品戦略等に貢献することが期待される。 |
| Ⅴ. 評価に関する事項 | 事前評価 | 平成18年度12月実施　　担当部　電子・情報技術開発部 |
| | 中間評価以降 | 平成21年度　事後評価実施予定 |
| | 作成時期 | 平成18年3月策定 |

| | | |
|---|---|---|
| Ⅵ. 基本計画に関する事項 | 変更履歴 | 平成 20 年 7 月､､イノベーションプログラム基本計画の制定により､「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂。 |

（ITイノベーションプログラム・エネルギーイノベーションプログラム）
「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」基本計画

電子・情報技術開発部

1．研究開発の目的・目標・内容
（1）研究開発の目的
情報家電の普及や通信需要の拡大に対処する電気エネルギーの高効率利用の実現、及びハイブリッド自動車や産業用の様々なモータ制御、家電製品の電源制御など、我が国の重要産業の国際競争力強化と省エネルギーを図るためには、その基盤となるパワーエレクトロニクスの研究開発が必要である。また、経済産業省が発表した新産業創造戦略（平成17年5月）において、我が国の産業競争力強化のために注力すべき分野として、環境・エネルギー機器が挙げられており、パワーエレクトロニクス機器には、一層の低消費電力化・小型化が求められている。本プロジェクトでは、自動車・家電製品等の低消費電力化実現に不可欠な炭化ケイ素（SiC）等を用いたパワーエレクトロニクスインバータ基盤技術を平成20年度までに確立し、我が国の関連産業の国際競争力強化と省エネルギーに資することを目的としてITイノベーションプログラム及びエネルギーイノベーションプログラムの一環として実施する。

現在、家電機器や産業用途機器、鉄道、電力系統などの幅広い分野においてパワーエレクトロニクス機器が活用されている。さらに今後は、ハイブリッド自動車や電気自動車の普及、高度情報通信機器の増加、分散電源や電力貯蔵装置などを含む低電圧配電システムが電力系統に幅広く導入されるのに伴い、パワーエレクトロニクス機器の電力変換容量拡大、変換損失低減と小型化の必要性が高まっている。その一方で、従来のシリコン（Si）スイッチング素子を用いたパワーエレクトロニクス機器では、Siの物性的な限界からさらなる性能向上は困難となりつつある。このような背景から、ワイドギャップ半導体であるSiCが、新たなパワーエレクトロニクス用半導体材料として注目されている。SiCスイッチング素子では、導通時の電力損失（オン損失）が従来素子の100分の1、動作周波数が10倍に向上し、動作温度は250℃を超え得ると理論的に予測されている。SiCスイッチング素子を用いることにより、従来のSi電力変換モジュールと比べて、大幅に低電力損失かつ高密度のSiC電力変換モジュールの実現が期待される。独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「ＮＥＤＯ技術開発機構」という）が編纂した、ＮＥＤＯ技術ロードマップ（平成17年版）では、我が国にとって、ワイドバンドギャップ半導体を用いた低損失・高パワー密度を実現するスイッチング素子開発が重要であり、その実現のためには多くの技術開発課題の解決に臨むことが求められている。

ＮＥＤＯ技術開発機構は、電力システムや燃料電池自動車等に用いられるパワーエレクトロニクス機器の超低損失化・小型化・軽量化を目指して、ワイドバンドギャップ半導体スイッチング素子の技術開発を行ってきた。超低損失電力素子技術開発プロジェクト（1998年～

2002年）では、SiCを用いた超低損失スイッチング素子の基盤技術開発と原型素子実証を行った。エネルギー使用合理化技術実用化開発(2003年-2005年)では、SiCスイッチング素子の実用化開発を行い、パワーモジュールの試作を行っている。

低損失・高密度パワーエレクトロニクス機器を実用化するためには、上記技術開発等の成果であるSiCスイッチング素子技術を用いて、低損失・高密度インバータ技術開発を行うことが必要である。すなわち具体的な適用製品を想定して、従来のSiスイッチング素子を高性能SiCスイッチング素子に置き換えてインバータに用いるための回路設計技術、ノイズ対策や熱設計などのSiCスイッチング素子実装に伴う課題等を解決していく必要がある。

一方、革新的な超低損失・高密度インバータを実現するために、SiCスイッチング素子の大容量化・信頼性向上・低損失化等のSiC材料のポテンシャルを最大限活用した高度化が求められる。これらの技術開発のためには素子特性評価とSiCウェハ評価を多面的に結びつけ、SiC単結晶ウェハおよびエピタキシャル成膜技術へフィードバックすることが不可欠である。さらに、高度化SiCスイッチング素子の性能を最大限活用したインバータ高パワー密度化に関わる設計技術・高速制御技術・高温実装技術等の基盤技術開発が必要である。

本プロジェクトでは、これらの要請を具現化して、SiCスイッチング素子を用いたパワーエレクトロニクスインバータ基盤技術を確立することを目的とする。

当該研究開発事業は、産業界も資金等の負担を行うことにより、市場化に向けた産業界の具体的な取り組みが示されていることを条件として実施する。

（２）研究開発の目標

具体的な製品応用を想定したSiCを用いた低損失インバータユニットを試作し、電力変換損失を同一定格のSiインバータユニットの30%以下に低減する。*

また、SiC材料のポテンシャルを最大限活用した革新的な超低損失・高密度インバータを実現するために、SiCスイッチング素子の大容量化・信頼性向上・低損失化等の性能高度化や、インバータ設計・高速制御・高温実装等に関わる基盤技術を確立する。

（３）研究開発内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

①高効率・高密度インバータユニット技術開発

②高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発

２．研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成18年度から平成20年度までの3年間とする。

３．研究開発の実施方式

---

* 目標値設定に関する詳細は別紙の研究開発計画で指定する

（１）研究開発の実施体制

ＮＥＤＯ技術開発機構が公募を行い、民間企業、独立行政法人、大学等から委託先を選定するものとする。本プロジェクトにおける研究開発と産業界の実用化に向けた取り組みを一体的にマネジメントするように、プロジェクトリーダ（PL）をＮＥＤＯ技術開発機構が指名する。また、SiCを含めたワイドギャップ半導体は、パワーエレクトロニクスや高周波応用が期待されており、また、その周辺技術の革新も目覚しいものがある。本プロジェクトを機動的に運営するために、調査委員会等を設け国内外の技術情報の収集およびプロジェクトへの適時活用を図る。

（２）研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任と決定権を有するＮＥＤＯ技術開発機構は、経済産業省及びPLと密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。また、必要に応じて、外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

４．評価の実施

ＮＥＤＯ技術開発機構は、技術的及び産業技術政策的観点から見た研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等の観点から、外部有識者による研究開発の事後評価を平成21年度に実施する。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

５．その他の重要事項

（１）研究開発成果の取扱い

① 成果の普及

得られた研究開発成果のうち共通基盤技術に係るものについては、プロジェクト内で速やかに共有した後で、ＮＥＤＯ技術開発機構及び実施者が協力して普及に努めるものとする。

② 知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備または標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準情報（ＴＲ）制度への提案等を積極的に行う。

③ 知的所有権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的所有権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

（２）基本計画の変更

ＮＥＤＯ技術開発機構は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、産業技術政策動向、プログラム基本計画の変更、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、

実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

（３）根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法（平成14年法律第145号）第15条第１項第１号ハ及び第２号に基づき実施する。

（４）その他

産業界が実施する研究開発との間で共同研究を行う等、密接な連携を図ることにより、研究開発を加速し、円滑な技術移転を促進する。

６．基本計画の改訂履歴

（１）平成18年3月、制定。

（２）平成20年6月、イノベーションプログラム基本計画の制定により、「（１）研究開発の目的」の記載を改訂。

（別紙）　研究開発計画

研究開発項目　①「高効率・高密度インバータユニット技術開発」

１．研究開発の必要性

　低損失・高密度化の要求が高いパワーエレクトロニクス機器を対象として、その中核となるSiCスイッチング素子を用いたインバータユニットの技術開発を行い、その実用化を目指す。インバータユニットとは、下の回路図に示す直流電圧を交流電圧に変換するインバータ基本構造とする。本研究開発では、SiCスイッチング素子をインバータに用いるために必要な、実装・冷却・素子駆動・ノイズ対策などのインバータユニットの設計とSiCスイッチング素子を含めたインバータユニット試作開発の総合技術開発を行う必要がある。

２．研究開発の具体的内容

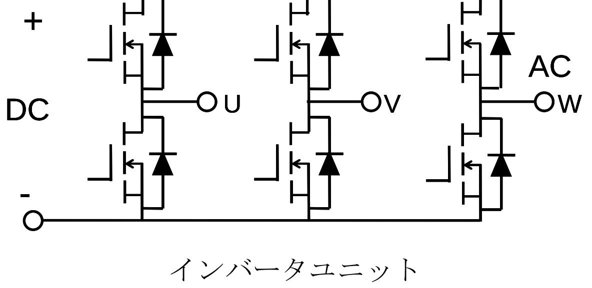
　インバータ用スイッチング素子の高性能化技術開発を行うと共に、それら高性能スイッチング素子を用いた高効率インバータユニットの試作を行い、その有効性を実証する。具体的には、ダイオード・MOS型スイッチング素子作製プロセス技術、素子耐圧安定化技術、素子オン抵抗低減化技術、インバータ化技術（素子保護、熱設計、低インダクタンス構造、最適スイッチング技術）等の技術開発を実施する。本研究項目で用いるSiCウェハの評価を、研究開発項目②における素子特性評価・ウェハ品質評価と密接に連携させて、ウェハ・スイッチング素子・インバータユニットの性能に関わる知見をプロジェクト全体で共有することにより、高効率・高密度インバータ実現に向けての課題解決に資するものとする。

３．達成目標

　具体的な製品応用を想定した、SiCスイッチング素子を用いたインバータユニットを試作し、同一定格のSiインバータユニットと比較して変換損失を大幅に低減することを実証する。

　一例として、産業用汎用インバータを想定した、AC400V系、3相、出力容量15kVA級のインバータユニットで、変換損失を同一定格のSiインバータユニットの30%以下に低減する。

　変換損失は開発インバータユニットの定格に依存するので、定格に応じて上記目標例と同等な性能向上を実証することとする。




インバータユニット

研究開発項目　②「高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発」

１．研究開発の必要性

SiC材料の特徴を活かした革新的なインバータ実用化のためには、その革新性（低損失・大容量・高温動作・小型化など）をもたらすSiCスイッチング素子の大容量化・信頼性向上・低損失化等の性能高度化が必要であり、さらに、それらの革新的SiCスイッチング素子を用いた超低損失・大容量インバータ開発のための設計・高速制御・高温実装などの技術開発が必要である。

２．研究開発の具体的内容

（１）インバータ大容量化基盤技術

インバータの革新的高度化を目指して、SiCウェハ品質とその上に作製した素子特性の関連を明らかにし、スイッチング素子特性劣化機構等を解明する。その知見を踏まえて素子あたり100 Aクラスの大容量化を実現するための基盤技術を開発する。

（２）インバータ信頼性向上基盤技術

前項目の特性劣化機構等の知見を踏まえて、SiCスイッチング素子の信頼性評価手法や高信頼性を実現する基盤技術を開発する。

上記2項目を効率的に遂行するために、プロジェクト全体でSiCウェハの管理を行い、素子特性評価とウェハ品質評価について系統的なデータの集積・管理を行う。

（３）インバータ高パワー密度化基盤技術

インバータの革新的高パワー密度化を目指して、SiC物性値限界に迫る低損失スイッチング素子を開発し、インバータ損失の低減を追及する。加えて、開発素子の活用に資するインバータ設計技術の高度化により、高パワー密度化を目指す。更にインバータ連携制御の要となる高速制御技術、及び高温動作を行うための実装技術の指針を提示する。

３．達成目標

（１）インバータ大容量化技術

SiCウェハの品質とその上に試作したスイッチング素子特性の関連を明確化する。インバータの大容量化に不可欠なスイッチング素子の大容量化に関しては、5 mm角級チップを試作し、電流容量100 Aの性能を達成する条件を明確にする。

（２）インバータ信頼性向上基盤技術

SiCスイッチング素子の信頼性評価手法を開発し長期信頼性を決めている要因を明確化する。特に最大の課題であるMOSスイッチング素子の酸化膜について、5 mm角級チップを試作し、実用素子に求められる信頼性を達成する条件を明確にする。

（３）インバータ高パワー密度化基盤技術

素子あたり10 A以上のSiC低損失MOSスイッチング素子（オン抵抗 2～5 mΩ·$cm^2$, 耐圧 0.6～1.7 kV）の開発を行う。インバータ損失の限界を追及する限界設計技術を開発し、高パワー密度(50 W/$cm^3$以上)のSiCインバータを実現に必要な条件を明らかにし、その見通しを明

確化する。同様に、高速制御技術および高温（250℃）環境での動作の実装技術の指針を提示する。

平成２０・０３・２７産局第１号

平成２ ０ 年４ 月１ 日

# ＩＴイノベーションプログラム基本計画

## １．目的

我が国が目指す高度情報通信ネットワーク社会の構築に向け、経済成長戦略大綱、ＩＴ新改革戦略、科学技術基本計画及び技術戦略マップ等に基づき、情報化の進展に伴うエネルギー消費量の増大等の課題にも考慮しつつ、その基盤となる情報通信機器・デバイス等の情報通信技術を開発し、実社会への利用を促進する。また、情報システム・ソフトウェアについて品質、信頼性及び生産性の向上を推進し、組込みソフトウェア産業強化、オープンソースソフトウェアを安心して活用するための環境整備、独創的な人材の発掘等、我が国産業競争力強化のための必要な基盤整備を実施することによって、ＩＴの利活用の深化･拡大を図り、より豊かな国民生活を実現するとともに、我が国の経済活力の向上を図ることを目的とする。

## ２．政策的位置付け

○「経済成長戦略大綱」（２００６年７月財政・経済一体改革会議。２００７年６月改訂、経済財政諮問会議報告）

ＩＴ革新による競争力強化、ＩＴ革新を支える産業・基盤の強化に必要な研究開発の推進に対応

○「第３期科学技術基本計画」（２００６年３月閣議決定）

国家的・社会的課題に対応した研究開発の重点推進４分野である情報通信分野、分野別推進戦略（２００６年３月総合科学技術会議）における重点分野である情報通信分野に位置づけられるもの。

○「ＩＴ新改革戦略」（２００６年１月高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部）

次世代のＩＴ社会の基礎となる研究開発の推進等に対応。

## ３．達成目標

（１）情報経済社会を形成する上で必要不可欠な基盤技術である情報通信機器・デバイス等に関しては、「革新的な技術の確立」と「その開発成果の普及促進」を図る。

【目標】

・情報通信機器･デバイス産業の付加価値額を、２０２０年度において、２００７年度比で、約５０％増加させる。

・半導体の微細化に係る革新的基盤技術の開発（テクノロジーノード４５ｎｍ以細）・情報家電の音声認識のタスク率（９５％以上の達成）

・革新的な大型ディスプレイ技術の開発（消費電力を現状機器と比較して約５０％以下）

・革新的なネットワーク機器技術の開発（消費電力を現状機器と比較して６０％以下）

（2）経済社会システムの信頼性確保に大きく寄与する情報システム・ソフトウェアに関しては、品質、信頼性及び生産性の向上や産学官の開発リソースの連携強化により、「人材育成」と「ソフトウェア工学の開発」等を積極的に推進する。

【目標】

・情報サービス・ソフトウェア産業の付加価値額を、２０１５年度において、２００４年度比で、約２５％増加させる。

・組込みシステム等の不具合発生率（２０１１年度までに２００６年度比５０％減）

4．研究開発内容

［プロジェクト］

（中略）

Ⅱ．省エネ革新

（中略）

［iii］省エネを支えるプロセス基盤技術

（1）パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

　エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーを進めるために、シリコンよりも材料特性に優れたワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス機器システムの基盤技術の開発を行う。

②技術目標及び達成時期

　２００８年度までに、ワイドバンドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス技術を開発する。

③研究開発期間

　２００６年度～２００８年度

（中略）

5．政策目標の実現に向けた環境整備

【法律】

・情報処理の振興を目的に、昭和４５年に情報処理の促進に関する法律が制定。

・半導体集積回路の回路配置の適正な利用の確保を目的に、昭和６３年に半導体集積回路の回路配置に関する法律が制定。

【税制】

・情報セキュリティ強化を確保しつつ生産性の向上を図るためのＩＴ投資に対し、３５％特別償却又は７％税額控除（情報基盤強化税制）。
・ソフトウェアを含む機械装置等に対し、３０％特別償却又は７％税額控除（中小企業投資促進税制）。

【国際標準化】

各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては、適切な標準化活動（国際規格（ＩＳＯ／ＩＥＣ））、日本工業規格（ＪＩＳ）、その他国際的に認知された標準の提案等）を実施する。特に、産学連携ソフトウェア工学の実践における組込みソフトウェア開発については、国際標準の動向を踏まえた開発を促進することにより、プロジェクトの成果の幅広い普及を促進する。

【関係機関との連携】

各プロジェクトのうち、研究開発を効率的・効果的に推進する観点から関係機関との連携が必要なものについては、これを積極的に行う。

但し、関係機関が行う研究開発等の独自性を妨げるものではない。

【導入普及促進〕

成果の普及を図るため、これまでの終了プロジェクトの成果の全部または、一部についてはオープンソースソフトウェアとして公開する。

【プロジェクト等の間の連携について】

高信頼な組込みソフトウェアの開発では、ソフトウェアエンジニアリングセンター（ＳＥＣ）において提供される各種エンジニアリング手法を開発現場に適用し、当該技術の効果を明らかにしながら開発を進める。

【その他】

・グラント事業

ＮＥＤＯの産業技術研究助成事業を活用し、萌芽的・革新的な情報通信関係の技術シーズの発掘を行う。また、ソフトウェア分野の独創的な技術やビジネスシーズを有した人材を発掘する。

・事業終了後の連携

産学官連携の研究体制を通して活動を行い、これらの事業の終了後も各分野の研究者・技術者が有機的に連携し、更に新たな研究を作り出す環境を構築する。

・人材育成

ハードウェア分野においては、出来る限り大学との連携を重視し、各種フェローシップ制度を活用しつつ、最先端の情報通信基盤研究現場への学生等の参画を推進することにより次世代の研究開発人材の育成を図る。また、ソフトウェア分野における独創的な人材を

発掘し、育成するとともに、優秀な人材が集うコミュニティを構築するなど、発掘された人材の才能をさらに伸ばすための取組を進める。

・広報／啓発

毎年１０月を「情報化月間」としている。

６．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

７．改訂履歴

（１）　平成１２年１２月２８日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画を制定。

（２）　平成１４年２月２８日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成１２・１２・２７工総第１２号）は廃止。

（３）　平成１５年１月３１日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成１４・０２・２５産局第１７号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成１４・０２・２５産局第１８号）は、廃止。

（４）　平成１５年３月１０日付け、情報通信基盤高度化プログラム基本計画、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤高度化プログラム基本計画（平成１５・０１・２９産局第１号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成１５・０１・２９産局第２号）は、廃止。

なお、情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成１５・０１・２９産局第１号）及び次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成１５・０１・２９産局第２号）の一部は、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画へ移行。

（５）　平成１６年２月３日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化プログラム基本計画（平成１５・０３・０７産局第１４号）、次世代半導体デバイスプロセス等基盤技術プログラム基本計画（平成１５・０３・０７産局第７号）、次世代ディスプレイ技術開発プログラム基本計画（平成１５・０３・０７産局第４号）は、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画に統合することとし、廃止。また、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成１５・０３・０７産局第１４号）は、廃止。

（６）　平成１７年３月２５日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成１６・０２・０３産局

第１号）は廃止。また、平成１７年３月３１日付け、情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成１６・０２・０３産局第２号）は廃止。

（７） 平成１８年３月３１日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成１７・０３・２５産局第７号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成１７・０３・２５産局第６号）は廃止。

（８） 平成１９年４月２日付け、高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画を制定。高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画（平成１８・０３・３１産局第４号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成１８・０３・３１産局第５号）は廃止。

（９） 平成２０年４月１日付け、ＩＴイノベーションプログラム基本計画を制定。情報通信機器高度化・デバイス基盤プログラム基本計画（平成１９・０３・１２産局第７号）及び情報通信基盤ソフトウェア開発推進プログラム基本計画（平成１９・０３・１２産局第８号）は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。

平成２０・０３・２５産局第５号
平成２０年４月１日

# エネルギーイノベーションプログラム基本計画

１．目的

資源に乏しい我が国が、将来にわたり持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。他方、エネルギー技術開発は、長期間を要するとともに大規模投資を伴う一方で将来の不確実性が大きいことから、民間企業が持続的な取組を行うことは必ずしも容易ではない。このため、政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、将来の不確実性に対する懸念が緩和され、官民において長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となる。以下に５つの政策の柱毎に目的を示す。

１－Ⅰ．総合エネルギー効率の向上

１９７０年代以来、官民をあげて省エネルギーに取り組み、産業構造の転換や新たな製造技術の導入、民生機器の効率改善等により世界最高水準の省エネルギーを達成している。今後、「新・国家エネルギー戦略」に掲げる、２０３０年までにＧＤＰあたりのエネルギー利用効率を約３０％向上を実現していくためには、産業部門はもとより、全部門において、総合エネルギー効率の向上に資する技術開発とその成果の導入を促進する。

１－Ⅱ．運輸部門の燃料多様化

ほぼ１００％を石油に依存する運輸部門は、我が国エネルギー需給構造上、最も脆弱性が高く、その需給構造の次世代化は、将来に向けた早急な対策が不可欠な課題となっている。

「新・国家エネルギー戦略」に掲げる目標（２０３０年に向け、運輸部門の石油依存度が８０％程度となることを目指す）の実現のためにも、官民が中長期的な展望・方向性を共有しつつ、技術開発と関連施策を推進する。

１－Ⅲ．新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーは、エネルギー源の多様化や地球温暖化対策の観点から重要である。しかし、現時点では経済性や出力安定性といった普及へ向けての課題が存在する。

そのため、これらの課題解決に向けた技術開発の推進及び新エネルギーの導入促進のための関連施策の実施により、更なる新エネルギーの普及を推進する。

１－Ⅳ．原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

原子力発電は供給安定性に優れ、運用時にＣＯ２を排出しないクリーンなエネルギー源である。安全確保を大前提に核燃料サイクルを含む原子力発電を着実に推進する。

１－Ⅴ．化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

化石燃料資源の大宗を輸入に依存する我が国にとって、その安定供給の確保は国家安全

保障に直結する課題である。このため、石油・天然ガス等の安定供給確保を目指し、我が国企業による資源国における資源開発等に対する支援等の施策を進めるとともに、その有効かつクリーンな利用を図る。

２．政策的位置付け

○ エネルギー基本計画（２００７年３月閣議決定）

重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策として、

１． 総合エネルギー効率の向上に資する技術
２． 原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保に資する技術
３． 運輸部門のエネルギー多様化に資する技術
４． 新エネルギーに関する技術
５． 化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用に資する技術

以上が位置づけられている。

○ 新・国家エネルギー戦略（２００６年５月）

世界最先端のエネルギー需給構造の実現を図るため

１． 省エネルギーフロントランナー計画
２． 運輸エネルギーの次世代化計画
３． 新エネルギーイノベーション計画
４． 原子力立国計画

以上の計画が位置づけられている。また、資源外交、エネルギー環境協力の総合的な強化を図るため、「総合資源確保戦略」が位置づけられている。

○ 第３期科学技術基本計画（２００６年３月閣議決定）

国の存立にとって基盤的であり国として取り組むことが不可欠な研究開発課題を重視して研究開発を推進する「推進４分野」であるエネルギー分野、分野別推進戦略（２００６年３月総合科学技術会議）における「推進４分野」であるエネルギー分野に位置付けられている。

○ 経済成長戦略大綱（２００６年７月財政・経済一体改革会議）

資源・エネルギー政策の戦略的展開として

１． 省エネルギーフロントランナー計画
２． 次世代自動車・燃料イニシアティブ等による運輸エネルギー次世代化
３． 新エネルギーイノベーション計画
４． 原子力立国計画
５． 資源外交、環境・エネルギー協力等の総合的な強化

以上が位置づけられている。

○ 京都議定書目標達成計画（２００５年４月閣議決定）

「京都議定書の約束を達成するとともに、更に「脱温暖化社会」に向けて長期的・継続的な排出削減を進めるには、究極的には化石燃料への依存を減らすことが必要で

ある。環境と経済の両立を図りつつ、これらの目標を達成するため、省エネルギー、未利用エネルギーの利用等の技術革新を加速し、効率的な機器や先進的なシステムの普及を図り、世界をリードする環境立国を目指す。」とされている。

３．達成目標

３－Ⅰ．総合エネルギー効率の向上

転換部門における「エネルギー転換効率向上」、産業部門における「製造プロセス向上」、民生・運輸部門における「省エネルギー」などにより、エネルギー消費効率を２０３０年度までに少なくても３０％改善することを目指す。

３－Ⅱ．運輸部門の燃料多様化

バイオマス由来燃料、ＧＴＬ、ＢＴＬ、ＣＴＬなどの新燃料、電気自動車や燃料電池自動車などの導入により、現在ほぼ１００％の運輸部門の石油依存度を２０３０年までに８０％程度とすることを目指す。

３－Ⅲ．新エネルギー等の開発・導入促進

太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーの技術開発や燃料電池など革新的なエネルギー高度利用を促進することにより、新エネルギー等の自立的な普及を目指すことで、エネルギー源の多様化及び地球温暖化対策に貢献する。

３－Ⅳ．原子力等利用の推進とその大前提となる安全の確保

２０３０年以降においても、発電電力量に占める比率を３０～４０％程度以上とすることを目指すため、高速増殖炉サイクルの早期実用化、既設軽水炉代替へ対応する次世代軽水炉の開発、軽水炉技術を前提とした核燃料サイクルの確立、放射性廃棄物対策などの技術開発を推進する。

３－Ⅴ．化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

石油・天然ガスの化石燃料の安定供給確保を目指し、資源獲得能力の強化に資する先端的な技術開発を推進するとともに、環境負荷低減のために化石燃料の効率的かつクリーンな利用を促進するための技術開発・導入を目指す。

４．研究開発内容

４－Ⅰ．総合エネルギー効率の向上

（中略）

４－Ⅰ－ⅵ．次世代省エネデバイス技術

（１）パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、省エネルギーを進めるために、シリコンよりも材料特性に優れたワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス機器システムの基盤技術

の開発を行う。

②技術目標及び達成時期

２００８年度までに、ワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス技術を開発する。

③研究開発期間

２００６年度～２００８年度

（中略）

５．政策目標の実現に向けた環境整備（成果の実用化、導入普及に向けた取組）

５－Ⅰ．総合エネルギー効率の向上

- 事業者単位の規制体系の導入
- 住宅・建築物に係る省エネルギー対策の強化
- セクター別ベンチマークアプローチの導入と初期需要創出（高効率機器の導入補助等）
- トップランナー基準の対象機器の拡充等
- アジアにおける省エネルギー対策の推進を通じた我が国の国際競争力の向上
- 国民の省エネルギー意識の高まりに向けた取組

５－Ⅱ．運輸部門の燃料多様化

- 公共的車両への積極的導入
- 燃費基準の策定・改定
- アジアにおける新エネルギー協力
- 国際標準化による国際競争力向上

５－Ⅲ．新エネルギー等の開発・導入促進

- 事業者支援補助金等による初期需要創出
- 新エネルギーベンチャービジネスに対する支援の拡大
- 新エネルギー産業構造の形成
- 電気事業制度・ガス事業制度の在り方の検討

５－Ⅳ．原子力利用の推進とその大前提となる安全の確保

- 電力自由化環境下での原子力発電の新・増設の実現
- 資源確保戦略の展開
- 次世代を支える人材育成
- 中小型炉の海外市場への展開、我が国原子力産業の国際展開支援
- 原子力発電拡大と核不拡散の両立に向けた国際的枠組み作りへの積極的関与
- 国と地域の信頼強化

５－Ⅴ．化石燃料の安定供給確保と有効かつクリーンな利用

- 資源国等との総合的な関係強化（研究開発の推進・協力、人材育成・技術移転、経済関係強化など）
- 化石燃料のクリーンな利用の開拓

６．研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金による実施されるもの（事業名に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

また、事業名に（採択テーマ）と記載された事業は、提案公募事業により採択されたテーマを記載したものであり、その採択や評価等は、提案公募事業の実施機関の責任の下、実施されるものである。

７．改訂履歴

（１）平成１６年７月７日付け、省エネルギー技術開発プログラム基本計画、新エネルギー技術開発プログラム基本計画、燃料技術開発プログラム基本計画、電力技術開発プログラム基本計画、原子力技術開発プログラム基本計画制定。固体高分子形燃料電池／水素エネルギー利用プログラム基本計画（平成１６・０２・０３産局第６号）は、新エネルギー技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。

（２）平成１７年３月３１日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成１６・０６・０４産局第８号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成１６・０６・０４産局第１０号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成１６・０６・０４産局第１２号）、電力技術開発プログラム基本計画（平成１６・０６・０４産局第１１号）、原子力技術開発プログラム基本計画（平成１６・０６・０４産局第１３号）は、廃止。

（３）平成１８年３月３１日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成１７・０３・２５産局第１４号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成１７・０３・２５産局第９号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成１７・０３・２５産局第１７号）、電力技術開発プログラム基本計画（平成１７・０３・２５産局第１２号）、原子力技術開発プログラム基本計画（平成１７・０３・２５産局第１３号）は、廃止。また、次世代低公害車技術開発プログラム基本計画（平成１７・０３・２９産局第２号）は、省エネルギー技術開発プログラム基本計画及び燃料技術開発プログラム基本計画に統合することとし、廃止。

（４）平成１９年４月２日付け制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成１７・０３・３１産局第１９号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成１８・０３・３１産局第１５号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成１８・０３・３１産局第１８号）、電力技術開発プログラム基本計画（平成１８・０３・３１産局第１７号）、原子力技術開発プログラム基本計画（平成１８・０３・３１産局第１６号）は、廃止。

（５）平成２０年４月１日付け、エネルギーイノベーションプログラム基本計画制定。省エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成１９・０３・２６産局第１号）、新エネルギー技術開発プログラム基本計画（平成１９・０３・２０産局第４号）、燃料技術開発プログラム基本計画（平成１９・０３・１９産局第７号）、電力技術開発プログラム基本

計画（平成１９・０３・１６産局第３号)、原子力技術開発プログラム基本計画（平成１９・０３・２３産局第２号）は、本プログラム基本計画に統合することとし、廃止。

【プロジェクト用語集】

| | 用語 | 説明 |
|---|---|---|
| 1 | SiC（炭化ケイ素）半導体 | 炭素（C）とケイ素（Si）の化合物であるSiC（Silicon carbide，炭化ケイ素）からなる半導体である。最大の特徴は，バンドギャップが3.25eVと従来のSi半導体に比べて3倍と広く，その分絶縁破壊にいたる電界強度が3MV／cmと10倍程度大きい点。また，熱伝導性，耐熱性，耐薬品性に優れ，放射線に対する耐性もSi半導体より高いという特徴を持つ。 |
| 2 | インバータ | 直流を交流に変換する装置を指す。これに対して，交流を直流に変換する装置をコンバータという。しかし，一般にはコンバータとインバータを組み合わせて，商用電源の周波数を変換する装置全体をインバータと呼ぶことが多い。インバータを使えば交流モータの回転速度を制御したり，照明器具の明るさを自在に調節することができる。 |
| 3 | IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistorの略。MOSFETとバイポーラトランジスタの複合素子で、電子、ホールの両方のキャリアが伝導に寄与するために、オン抵抗値がユニポーラ型のMOSFETよりも低いが、スイッチング損失が大きく、スイッチング速度が遅い。Siのパワー素子で非常に広範囲に使われている。 |
| 4 | ワイドバンドギャップ半導体 | バンドギャップの大きい半導体。「大きい」は相対的なものではっきりとはしないが、シリコンのバンドギャップの2倍程度である2.2eV程度以上のバンドギャップを持つ場合にワイドギャップと呼ぶことが多い。<br>例えば窒化ガリウム（GaN)では、炭化ケイ素（SiC）、ダイヤモンドなどがある。 |
| 5 | エピタキシャル成膜技術 | 結晶基板上に結晶軸のそろった結晶層を成長させる技術。不純物や欠陥のない結晶層を作る。基板上でガスを反応させて結晶層を積み上げるVPE（気相成長）法と溶液を接触させて結晶相を成長させるLPE（液晶成長）法がある。 |
| 6 | 汎用インバータ | 周波数と電圧を制御することによって、モーターの回転を高度に制御する可変速装置です。汎用インバータとは名前の示すとおり、建設・土木機械、食料加工機械、搬送機械、ファン・ポンプなど極めて広範な用途をもっており、多くの産業機器に使われています。汎用インバータの定義には｛100KVA以下で、主として汎用3相囲い型誘導電動機（37キロワット以下）を駆動することを目的として、標準仕様により量産されている電圧型インバーター｝や｛容量範囲が75KW（1馬力）以下のもの｝などがあります。 |
| 7 | ダイオード | 整流作用（電流を一定方向にしか流さない作用）を持つ電子素子。 |
| 8 | SBD（ショットキーバリアダイオード） | 金属と半導体とのショットキー接合の整流作用を利用している。順方向の電圧降下が低く、逆回復時間が短いため、高周波の整流に適する。一般的に漏れ電流が多く、サージ耐力が低い。 |
| 9 | PiNダイオード | 通常のダイオードがP層とN層の2層構造であるのに対し、中間層としてI層と呼ばれる真性半導体層を持つため3層構造となっている。I層は真性半導体とは言うものの、実際には不純物濃度が低いn型半導体である。I層の存在により、PNダイオードよりも順方向電圧降下が若干大きくなるが、逆方向阻止電圧が高い素子を作ることができる。 |
| 10 | キャリア周波数 | PWM制御（パルス幅変調）方式の時、インバータで出力電圧形のパルス幅を決めるための変調波の周波数。 |
| 11 | MOSFET | 電界効果トランジスタ(FET)の一種で、LSIの中では最も一般的に使用されている構造である。U字型ゲートをもつMOSFETをUMOSという。 |
| 12 | DMOS | Double Diffused MOS：2重拡散型MOS。従来の信号処理用のMOSトランジスタではチャネル部分の拡散は1回で、マスク寸法でチャネル長が決まり比較的高い抵抗値を有したのに対し、ドライバの出力部に用いるDMOSではチャネル部分への2回の拡散での横方向への広がりの差を利用して実効的なチャネル長をサブミクロンまで短くし、トランジスタのON抵抗を非常に低くしています。 |

| | 用語 | 説明 |
|---|---|---|
| 13 | IE-MOS | Implantation and Epitaxial MOSFET。産総研が開発したMOSFETで現在、世界最小のオン抵抗値を有する。 |
| 14 | X線トポグラフィー | 結晶からのブラッグ反射像を写真、あるいはテレビにより拡大して結晶の種々の特性を静的、動的に観察する結晶解析の一方法。 |
| 15 | チャネル移動度 | 移動度は、固体の中でのキャリアの流れやすさを表す指標で、加えた電界強度とキャリアの走行速度の比例計数である。同じ大きさの電圧を加えたときには、移動度が大きいほど、キャリアの走行速度が大きくなり、電流が増加する。チャネル移動度は、トランジスタ（MOSFET）の性能指標の一つ。電子の動きやすさ、即ちトランジスタ内を電子が流れる速度を表わすもので、この数値が大きいものほどトランジスタのオン抵抗が下がり、動作スピードが速い。 |
| 16 | 転位 | 結晶中に含まれる、線状の結晶欠陥のことである。外力等によって、転位近傍の原子が再配置されることによって転位の位置が移動し材料が変形する為、変形に要する力は原子間の結合力から理論的に計算される力よりも小さく金属の硬さ（変形のしにくさ）は転位の動きやすさが決めている。転位が動くことによって、金属等は外力に対して、破壊せずに変形する塑性変形を起こす。<br>転位には刃状転位（エッジ・ディスロケーション）と、螺旋転位（スクリュー・ディスロケーション）と、2つが混合した混合転位が有る。 |
| 17 | TDDB／TZDB | Time Dependent Dielectric Breakdown。酸化膜(絶縁膜)の経時破壊現象です。<br>酸化膜の絶縁破壊強度は通常、10MV/cm 以上と高電界であるが、実使用状態等のような低電界においても時間経過とともに破壊が起こる現象がみられ、これをTDDB と呼び、特に近年の集積度の向上と共に微細化に伴うゲート酸化膜の薄膜化と電界 強度の増加により重要な故障要因の一つとなっている。TZDB（time zero dielectric breakdown）は瞬時絶縁破壊。 |
| 18 | GaN | ガリウムナイトライド (gallium nitride) とも呼ばれる窒化物半導体である。バンドギャップがSiより3倍広いという特性を活かして，青色発光ダイオード（LED）や青紫色半導体レーザといった発光デバイスが実用化している。また，GaNをトランジスタに適用しようという試みも活発化しており、（1）耐圧が高い，（2）高温で動作する，（3）電流密度を大きくできる，（4）スイッチングが高速である，（5）オン抵抗が小さい、という特徴を持っており、SiC半導体と並ぶ次世代パワー半導体デバイスとして期待されている。 |
| 19 | EMI | EMIとは電子機器が発する電磁波が周辺の他の電子機器の動作に影響を及ぼす現象のこと。Electro Magnetic Interference．電磁干渉．電磁妨害。 |
| 20 | エコキュート | ヒートポンプ技術を利用し空気の熱で湯を沸かすことができる電気給湯機のうち、冷媒として、フロンではなく二酸化炭素を使用している機種の総称。 |
| 21 | TEG | test element group。特性評価用素子。ウェハ上にチップと同様に作ることが多い。 |
| 22 | トポロジー | 要素どうしの近さや繋がり方。 |
| 23 | DC/DCコンバータ | 直流電圧を別の直流電圧に変換するのがDC-DCコンバータの役割。変換効率にすぐれるスイッチング方式のDC-DCコンバータは、電子機器の省電力化や小型・軽量化に貢献。 |

| | 用語 | 説明 |
|---|---|---|
| 24 | フォトルミネッセンス | 一般に、物質にエネルギーを与えた時、エネルギーの放出を発光という形で行う現象がルミネッセンス（Luminescence）です。光によりエネルギーを与えた場合の発光をフォトルミネッセンスといいます。 半導体結晶におけるフォトルミネッセンスは、格子欠陥や不純物の影響を受けやすいため、広い意味での”結晶中の欠陥”を高感度に検出することが可能となります。不純物や欠陥に起因した発光の強度分布を測定することにより、結晶の均一性や欠陥の分布状況を高い分解能で評価することが可能です。 |
| 25 | EBIC法 | Electron Beam Induced Currentの略で電子線励起電流法。SEM装置内で試料に電子ビームを照射した際、試料中に生じた電流を測定する方法。EBIC信号を測定することにより、試料内部の電界構造（半導体の接合構造）に関する情報を得ることが出来る。 |
| 26 | DIMOS | Double-Implanted MOSFET.<br>Pウエル部分とソース部分の両方をイオン注入で形成する縦型パワーMSOFETのこと。 |
| 27 | 負荷短絡耐量 | 電源回路では、負荷を短絡して短絡電流が流れた時に、電流検出で１０μsec程度は必要な為、その間にFETが破壊しないような負荷短絡耐量が求められています。 |
| 28 | アバランシェ耐量 | アバランシェ（Avalanshe）とは雪崩の意味でFETは電子雪崩が発生します。<br>ソース－ドレイン間に高電圧を与え、リーク電流を流した状態をアバランシェ降伏といいます。 |
| 29 | デットタイム | 回路上でMOSFETが同時にオンしたときには，オン抵抗だけでしか制約されない大きな貫通電流が流れてMOSFETが破損する。MOSFETのスイッチングには時間がかかるため，安全を見込んだ時間（デッドタイムと呼ぶ），上下のMOSFETを同時にオフさせて，同時にオンしないようにしています。 |
| 30 | ダイボンディング | はんだ、金メッキ、樹脂を接合材料として、ダイ（電子回路を作り込んだSiC基板のチップ）をリードフレーム（LF）や基板等に接着すること。 |

Ⅰ．事業の位置付け・必要性について

1．ＮＥＤＯの関与の必要性・制度への適合性

1.1 ＮＥＤＯが関与することの意義

情報家電の普及や通信需要の拡大に対処する電気エネルギーの高効率利用の実現、及びハイブリッド自動車や産業用の様々なモータ制御、家電製品の電源制御など、我が国の重要産業の国際競争力強化と省エネルギーを図るためには、その基盤となるパワーエレクトロニクスの研究開発が必要である。また、経済産業省が発表した新産業創造戦略（平成 17 年 5 月）において、我が国の産業競争力強化のために注力すべき分野として、環境・エネルギー機器が挙げられており、パワーエレクトロニクス機器には、一層の低消費電力化・小型化が求められている。

本プロジェクトでは、自動車・家電製品等の低消費電力化実現に不可欠な炭化ケイ素（SiC）等を用いたパワーエレクトロニクスインバータ基盤技術を平成 20 年度までに確立し、我が国の関連産業の国際競争力強化と省エネルギーに資することを目的として IT イノベーションプログラム及びエネルギーイノベーションプログラムの一環として実施する。

現在、家電機器や産業用途機器、鉄道、電力系統などの幅広い分野においてパワーエレクトロニクス機器が活用されている。さらに今後は、ハイブリッド自動車や電気自動車の普及、高度情報通信機器の増加、分散電源や電力貯蔵装置などを含む低電圧配電システムが電力系統に幅広く導入されるのに伴い、パワーエレクトロニクス機器の電力変換容量拡大、変換損失低減と小型化の必要性が高まっている。その一方で、従来のシリコン（Si）スイッチング素子を用いたパワーエレクトロニクス機器では、Si の物性的な限界からさらなる性能向上は困難となりつつある。このような背景から、ワイドギャップ半導体である SiC が、新たなパワーエレクトロニクス用半導体材料として注目されている。SiC スイッチング素子では、導通時の電力損失（オン損失）が従来素子の 100 分の 1、動作周波数が 10 倍に向上し、動作温度は 250℃を超え得ると理論的に予測されている。SiC スイッチング素子を用いることにより、従来の Si 電力変換モジュールと比べて、大幅に低電力損失かつ高密度の SiC 電力変換モジュールの実現が期待される。独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「ＮＥＤＯ技術開発機構」という）が編纂した、ＮＥＤＯ技術ロードマップ（平成 17 年版）では、我が国にとって、ワイドギャップ半導体を用いた低損失・高パワー密度を実現するスイッチング素子開発が重要であり、その実現のためには多くの技術開発課題の解決に臨むことが求められている。

ＮＥＤＯ技術開発機構は、電力システムや燃料電池自動車等に用いられるパワーエレクトロニクス機器の超低損失化・小型化・軽量化を目指して、ワイドギャップ半導体スイッチング素子の技術開発を行ってきた。超低損失電力素子技術開発プロジェクト（1998 年～2002 年）では、SiC を用いた超低損失スイッチング素子の基盤技術開発と原型素子実証を行った。エネルギー使用合理化技術実用化開発（2003 年-2005 年）では、SiC スイッチング素子の実用化開発を行い、パワーモジュールの試作を行っている。

低損失・高密度パワーエレクトロニクス機器を実用化するためには、上記技術開発等の成果である SiC スイッチング素子技術を用いて、低損失・高密度インバータ技術開発を行うことが必要である。すなわち具体的な適用製品を想定して、従来の Si スイッチング素子を高性能 SiC スイッチング素子に置き換えてインバータに用いるための回路設計技術、ノイズ対策や熱設計

などのSiC スイッチング素子実装に伴う課題等を解決していく必要がある。

一方、革新的な超低損失・高密度インバータを実現するために、SiC スイッチング素子の大容量化・信頼性向上・低損失化等のSiC 材料のポテンシャルを最大限活用した高度化が求められる。これらの技術開発のためには素子特性評価と SiC ウェハ評価を多面的に結びつけ、SiC 単結晶ウェハおよびエピタキシャル成膜技術へフィードバックすることが不可欠である。さらに、高度化SiC スイッチング素子の性能を最大限活用したインバータ高パワー密度化に関わる設計技術・高速制御技術・高温実装技術等の基盤技術開発が必要である。

本プロジェクトでは、これらの要請を具現化して、SiC スイッチング素子を用いたパワーエレクトロニクスインバータ基盤技術を確立することを目的とする。

1.2 実施の効果

（1）費用対効果

本プロジェクトは総額40.4億円により、SiCインバータを開発するものである。助成先の事業に参加しているメーカ各社（三菱電機株式会社、株式会社日立製作所、株式会社東芝、富士電機デバイステクノロジー株式会社、日産自動車株式会社、シャープ株式会社、沖電気工業株式会社後に参加メンバーがOKIセミコンダクタ株式会社）は開発されたSiC半導体デバイスとそれを応用したインバータ技術を活用してSiC半導体デバイス応用製品を開発する。本プロジェクトによって実現されるSiC半導体デバイスとそれを応用したインバータ技術は主に汎用インバータが用いられる工業用モータ機器市場において活用される。汎用の工業用モータドライブ用インバータの世界市場は、2008年では1,570億円、2013年予測では2,120億円(1ドル＝100円で換算）である。

2009年度において日本企業はこの市場において約50%のシェアを占め、今後も強い国際競争力を維持することが望まれる。本プロジェクトによって実現される省エネ、小型化のためのSiCインバータ技術は、この市場における日本企業の競争力強化に貢献するものと期待される。

（２）省エネルギー効果
（出典：H20 年３月「次世代省エネデバイス技術調査報告書」（財）新機能素子研究開発協会を一部改訂）

①各製品分野におけるSi デバイスからＳｉＣデバイスに置換えることによる効率の向上

| 製品分野 | 現在（Siデバイス使用）の機器の総合平均効率（％） | 内Si半導体デバイスによる損失分（％） | SiC半導体デバイス導入による効率向上分（％） |
|---|---|---|---|
| エアコン | 93.0 | 3.5 | 2.5 |
| 冷蔵庫 | 92.0 | 3.5 | 2.5 |
| 電気自動車（HEV／EV） | 80.0 | 20.0 | 11.5 |
| 汎用インバータ | 93.7 | 2.9 | 2.0 |
| コンピュータ関連 | 87.3 | 6.8 | 4.7 |
| 無停電電源等IT機器関連電源 | 91.8 | 5.9 | 4.1 |
| 太陽光発電用インバータ | 96.2 | 2.9 | 2.0 |
| 燃料電池用インバータ | 93.9 | 4.7 | 3.3 |
| 汎用モータのインバータ化による効果 | | | 20.0 |

図表Ⅰ-1. 各製品分野におけるSi デバイスからＳｉＣデバイスに置換えることによる効率の向上

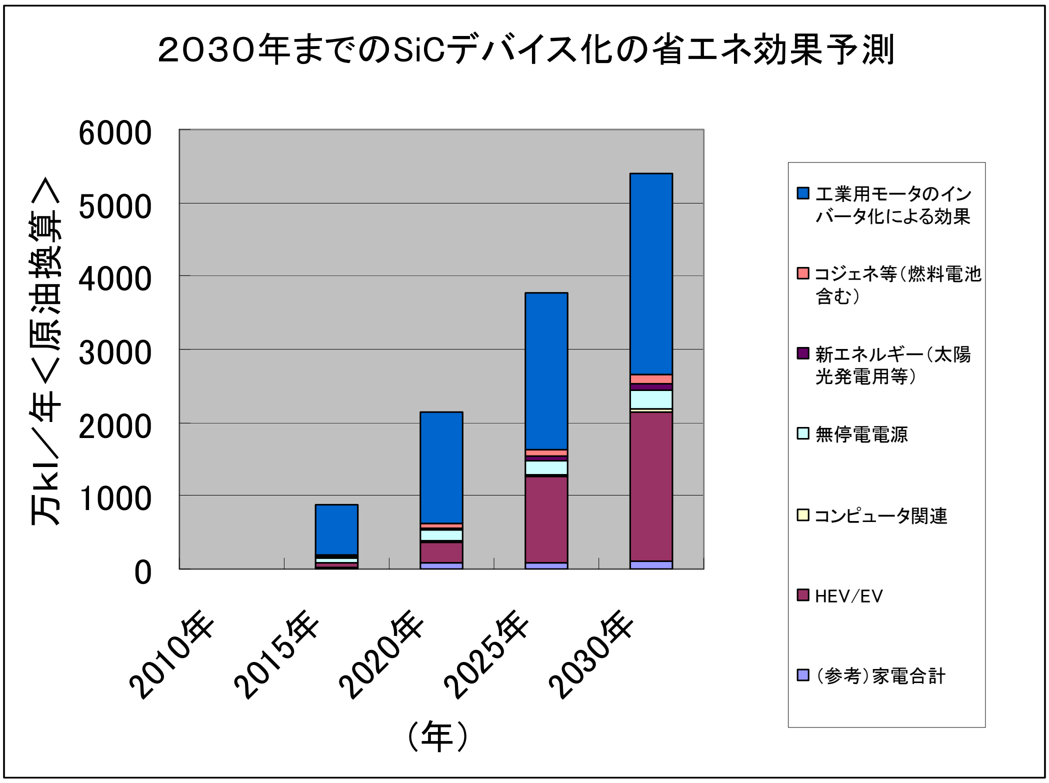
②2030 年までのSiC デバイス化による省エネ効果の予測

（単位＜原油換算＞：万ｋｌ／年）

| 製品分野 ＼ 年 | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 |
|---|---|---|---|---|---|
| ①(参考)家電合計 | 0 | 29 | 77 | 87 | 97 |
| ②HEV/EV | 0 | 58 | 292 | 1169 | 2045 |
| ③汎用インバータ | 0 | 63 | 126 | 292 | 457 |
| ④コンピュータ関連 | 0 | 0 | 23 | 35 | 47 |
| ⑤無停電電源 | 0 | 72 | 139 | 192 | 244 |
| ⑥新エネルギー(太陽光発電用等) | 0 | 8 | 25 | 63 | 100 |
| ⑦コジェネ等(燃料電池含む) | 0 | 35 | 57 | 86 | 114 |
| 工業用モータのインバータ化による効果 | 0 | 683 | 1524 | 2134 | 2743 |
| <①～⑦>合計 | 0 | 265 | 739 | 1924 | 3104 |
| <①～⑧:③除く>合計 | 0 | 885 | 2137 | 3766 | 5390 |

図表Ⅰ-2. 2030 年までの SiC デバイス化による省エネ効果の予測

③2030 年までのＳｉＣデバイス適用による省エネ効果予測




図表Ⅰ-3. 2030 年までのＳｉＣデバイス適用による省エネ効果予測

④各製品分野の省エネ効果予測に用いた仮定

図表Ⅰ-4. 各製品分野の省エネ効果予測に用いた仮定

| 製品分野 | 省エネ効果算出仮定 |
|---|---|
| エアコン | 家庭用エアコン年間総消費電力: 950KWh／台; 保有台数100,000千台。<br>2015年は30%、2020年は80%、2030年は100%、 がSiC化と仮定。 |
| 冷蔵庫 | 家庭用冷蔵庫年間総消費電力: 520KWh／台; 保有台数60,000千台<br>2015年は30%、2020年は80%、2030年は100%、 がSiC化と仮定。 |
| 参考:家電合計 | 冷蔵庫、TV, エアコン、洗濯機、照明の前回調査書の比で割り出したもの。<br>家電全体／(エアコン＋冷蔵庫)＝1.3 |
| 電気自動車(HEV／EV) | 前回調査により、ストック台数を2015年:100万台、2020年:500万台、<br>2030年:35百万台が電動化するとした。自動車は40KWの平均出力とした。 |
| 汎用インバータ | 2015年、2020年における一台当りの損失低減は122kWh／年(2%低減)として、前回調査の方法を元に算出。2030年については、総電力消費量の予測を基に算出。 |
| コンピュータ関連 | PFCへの適用。効率向上分以外は平成16年度 NEDO委託業務 調査研究報告書「SiCパワーエレクトロニクス実用化・導入普及戦略に係る調査研究」(平成17年3月発行;素子協)の算出法にもとづいて算 |
| 無停電電源等IT機器関連電源 | 2015年:1391億KWhの50%、2020年:1904億KWhの70%、2025年:2418億KWhの80%、<br>2030年:2932億KWhの80%、にSiCを導入。 |
| 新エネルギー(太陽光発電等) | 効率向上分の見直し以外は以下の通り、平成16年度 NEDO委託業務 調査研究報告書「SiCパワーエレクトロニクス実用化・導入普及戦略に係る調査研究」(平成17年3月発行;素子協)の算出法にもとづいて算出。 |
| コジェネ等(燃料電池含む) | |
| 汎用モータのインバータ化による効果 | 総電力使用量予想値は2015年、2020年、2030年それぞれ1.12,1.25,1.50兆KWh／年、とし、インバータ化率はそれぞれ30,50,70%とする。インバータ化による省エネ率は20%とした。 |

1.3 情勢変化への対応

平成１８年度、本プロジェクトによって、世界で最小のオン抵抗値を持つ IEMOSFET の開発・実証を行ったことから、更に SiC ウェハの結晶欠陥低減に資するデバイスの特性分析とデバイス製造要素技術の高度化を図る必要があることが判ったので、平成 18 年度の加速テーマとして実施することとした。

平成 19 年度、確立した SiC 基板欠陥評価方法を用いて、４インチウェハ評価を実施し、三菱電機において、ダイオード試作評価を実施し、素子特性を劣化させるメカニズム解明に資する共に、実用化のためのプロセスコストの低減を図った高効率インバータ実現に向けての課題解決を加速する必要があることが判った。また、フィルター等の小型化が期待できるインバータの高キャリア周波数化に関し評価検討を行い、その効果を検証する必要があることが判ったので、これらを平成１９年度の加速テーマとして実施することとした。

平成２０年度、SiC を用いたインバータ実用化に向けては、材料欠陥・プロセス起因欠陥の低減によるデバイスの歩留まり信頼性向上が求められており、そのための基盤技術の確立を図るためにもプロセス起因欠陥においては、イオン注入後に行う活性化熱処理によるウェハ表面荒れが最も大きな課題であった。これを回避できる手法が明らかになったので、本技術をプロセス技術として平成 20 年度の加速テーマとして実施することとした。

1.4 評価に関する事項

技術的及び産業政策的観点から見た技術開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果、技術研究成果の実用化・事業化等の観点から、外部有識者による技術開発の事後評価を平成２１年度までに実施する。

2. 事業の背景・目的・位置づけ

高度情報化社会のもと、情報流、エネルギー流、物流における電力エネルギーの重要性が益々増大しており、温暖化防止、省資源、産業の活性化を満たす持続的発展可能な社会を形成してゆくためには、従来のレベルより格段に優れた省エネルギー技術の開発が必要である。本プロジェクトにおいては、電気エネルギーの高効率利用を図るため、電力エネルギー変換の高度化の中心技術であるインバータ技術を革新することを目指す。そのために性能が材料物性値の限界に近づきつつあるSi（シリコン）半導体パワーデバイスにかえてSi半導体デバイスの１０分の１以下への低損失化が可能となるSiC(シリコンカーバイド)を中心とするワイドギャップ半導体デバイスを用いたインバータ基盤技術を確立する。

世界的に見れば、日本ではSiCの基礎研究が先駆的に行われていたものの、パワーデバイスとしての研究開発は米国と欧州が大きく先行していた。国家プロジェクト「超低損失電力素子技術開発」(1998～2002年度)により我が国半導体産業界におけるSiC半導体基盤技術育成が行われ、ついで「エネルギー使用合理化技術戦略的開発事業」の一環として（2003～2005年度）においてデバイスからモジュール化の推進が行われ、我が国でもパワーエレクトロニクスとしての実用化へ向けての可能性を追求するレベルまで来た。

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

本研究開発の目標は、　具体的な製品応用を想定した SiC を用いた低損失インバータユニットを試作し､電力変換損失を同一定格のSiインバータユニットの30%以下に低減する。また､SiC材料のポテンシャルを最大限活用した革新的な超低損失・高密度インバータを実現するために､SiCスイッチング素子の大容量化･信頼性向上･低損失化等の性能高度化や､インバータ設計・高速制御・高温実装等に関わる基盤技術を確立することである。

これらの目標を達成するために、下記の技術開発を行う。

①高効率・高密度インバータユニット技術開発

インバータ用スイッチング素子の高性能化技術開発を行うと共に、それら高性能スイッチング素子を用いた高効率インバータユニットの試作を行い、その有効性を実証する。具体的には、ダイオード・MOS型スイッチング素子作製プロセス技術、素子耐圧安定化技術、素子オン抵抗低減化技術、インバータ化技術（素子保護、熱設計、低インダクタンス構造、最適スイッチング技術）等の技術開発を実施する。本研究項目で用いる SiC ウェハの評価を、研究開発項目②における素子特性評価・ウェハ品質評価と密接に連携させて、ウェハ・スイッチング素子・インバータユニットの性能に関わる知見をプロジ

ェクト全体で共有することにより、高効率・高密度インバータ実現に向けての課題解決に資するものとする。

②高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発

（１）インバータ大容量化基盤技術

インバータの革新的高度化を目指して、SiCウェハ品質とその上に作製した素子特性の関連を明らかにし、スイッチング素子特性劣化機構等を解明する。その知見を踏まえて素子あたり100 Aクラスの大容量化を実現するための基盤技術を開発する。

（２）インバータ信頼性向上基盤技術

前項目の特性劣化機構等の知見を踏まえて、SiCスイッチング素子の信頼性評価手法や高信頼性を実現する基盤技術を開発する。

上記2項目を効率的に遂行するために、プロジェクト全体でSiCウェハの管理を行い、素子特性評価とウェハ品質評価について系統的なデータの集積・管理を行う。

（３）インバータ高パワー密度化基盤技術

インバータの革新的高パワー密度化を目指して、SiC 物性値限界に迫る低損失スイッチング素子を開発し、インバータ損失の低減を追及する。加えて、開発素子の活用に資するインバータ設計技術の高度化により、高パワー密度化を目指す。更にインバータ連携制御の要となる高速制御技術、及び高温動作を行うための実装技術の指針を提示する。

| 研究開発項目（個別テーマ） | 研究開発目標（最終） | 根 拠 |
|---|---|---|
| ①高効率・高密度インバータユニット技術開発 | 具体的な製品応用を想定したSiCを用いた低損失インバータユニットを試作し、電力変換損失を同一定格のSiインバータユニットの30％以下に低減する。 | 産業用モータ応用を目的とした汎用インバータにおいて、SiCスイッチング素子を用いたオールSiCインバータユニットを試作し、Siと比較して変換損失を大幅に低減することを実証し、SiCパワーデバイスの価値を示すことが必要。 |
| ②高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発 | （１）インバータ大容量か技術<br>SiCウェハの品質とその上に試作したスイッチング素子特性の関連を明確化する。インバータの大容量化に不可欠なスイッチング素子の大容量化に関しては、5mm角級チップを試作し、電流容量100Aの性能を達成する条件を明確にする。 | Siデバイスに対して、明確な代替価値を見出すためには、SiCワンチップに大電流容量が可能となる必要があり、SiCウェハの結晶欠陥がクリアできれば物性的に可能であり、その条件を明確にすることは実用化に必須の課題である。 |
| | （２）インバータ信頼性向上基盤技術<br>SiCスイッチング素子の信頼性評価手法を開発し長期信頼性を決めている要因を明確化する。特に最大の課題であるMOSスイッチング素子の酸化膜について、5mm角級チップを試作し、実用素子に求められる信頼性を達成する条件を明確にする。 | ノーマリオフ素子が可能であるMOSFETにおいて、ゲート酸化膜および酸化膜／SiC界面での信頼性の確保することが、従来からの重要課題であり信頼性を達成するための要件を得ることが必要である。 |
| | （３）インバータ高パワー密度化基盤技術<br>素子あたり10A以上のSiC低損失MOSスイッチング素子（オン抵抗 2～5mΩcm2、耐圧0.6～1.7kV）の開発を行う。インバータ損失の限界を追求する限界設計技術を開発し、高パワー密度（50W/cm3以上）のSiCインバータの実現に必要な条件を明らかにし、その見通しを明らかにする。同様に、高速制御技術および高温（250℃）環境での動作の実装技術の指針を提示する。 | インバータは高エネルギー密度化すなわち高性能化することにより、小型化し製品価値の向上に繋がる。SiCデバイス応用によるその究極点およびもう一つ長所である高温での動作が可能であるという点について、見極めることがSiCパワーデバイスの将来展望を持つことに繋がる。 |

図表Ⅱ-1. 研究開発目標とその妥当性

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

| 研究開発項目 | 研究分野 | 研究課題 | 研究グループ |
|---|---|---|---|
| ①高効率・高密度インバータユニット技術開発 | ・ 半導体デバイス開発<br>・ パワーエレクトロニクス | SiC－MOSFET、SBD の開発とオール SiC１４KVA インバータユニットの性能実証 | 伊丹サイト：<br>三菱電機㈱先端技術総合研究所 |
| ②高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発 | ・ 材料評価技術<br>・ 半導体デバイス開発 | ②-1 インバータ大容量化技術：基板の結晶欠陥とデバイス特性の関連を解明 | つくばサイト：<br>産総研/エネルギー半導体エレクトロニクスラボ、素子協（日立、東芝、富士電機 AT/DT、沖電気、三菱電機） |
| | ・ 材料評価技術<br>・ 半導体デバイス開発<br>・ 半導体デバイスプロセス技術 | ②-2 インバータ信頼性向上基盤技術：<br>MOSFET のゲート酸化膜の信頼性向上要因解明とプロセス要素技術開発 | つくばサイト：<br>産総研/エネルギー半導体エレクトロニクスラボ、素子協（日立、東芝、富士電機 AT/DT、沖電気） |
| | ・ 半導体デバイス開発<br>・ パワーエレクトロニクス | ②-3 インバータ高パワー密度化基盤技術 | つくばサイト：<br>産総研/エネルギー半導体エレクトロニクスラボ、素子協（東芝、日産自動車、シャープ） |

図表Ⅱ-2.　研究開発項目の研究課題と担当研究グループ

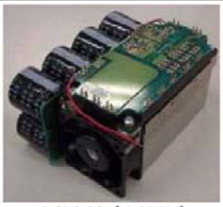
（研究開発計画）

| 研究開発項目 | | 平成18年度 | 平成19年度 | 平成20年度 |
|---|---|---|---|---|
| ①高効率・高密度インバータユニット技術開発 | | 656百万円 | 368百万円 | 250百万円 |
| | | 終端構造の最適化検討。セルの微細化検討。ゲート絶縁膜形成技術、素子構造最適化検討に着手。素子高性能化技術を基に10A級のパワーモジュールを試作しスイッチング特性と不良モード検証を実施。スイッチング損失駆動方式の検討。デバイス動作解析技術とインバータ熱解析技術の開発。 | ゲート形成工程の最適化検討。素子試作工程の評価管理設備を導入し試作プロセスの高度化を図る。大容量化に向けた並列駆動方法（素子特性、駆動法、主回路構造）を確立。出力容量（14kVA）の3相インバータユニットにおいて同定格Siインバータ比で損失30％以下を達成するための条件（素子特性、駆動条件、インバータユニット構造等）を明らかにし、その見通しを明確にする。高キャリア周波数化を検討するために高キャリア周波数駆動試験設備を導入し、高キャリア周波数化に向けた基礎特性評価を実施。 | H18、19年度で実施した開発で得られた素子限界特性、並列駆動技術等の知見を元に、AC400V系、出力容量14 kVAの3相インバータユニットを設計、試作する。また同インバータユニットの損失が同定格のSiインバータユニットの30％以下であることを実証する。パワーエレクトロニクス機器のフィルター類減による小型・低コスト化、低高調波化、高機能化が期待できるインバータの高キャリア周波数化（＞15kHz）に関し、H19年度の基礎評価を元に、伝導および放射ノイズ高精度評価、熱抵抗の高精度評価、高速SWの過渡解析等の評価検討を実施し、インバータ設計により高周波化効果を検証する。 |
| ②高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発 | | 1,411百万円 | 721百万円 | 638百万円 |
| | ②-1 インバータ大容量化技術 | 2インチSiC基板において、1mm□～3mm□のSiCスイッチング素子（DMOS、UMOS）と整流素子（PiNダイオード、SBD）を試作して順方向特性、逆方向耐圧を測定して、マッピングを行うプロセスを確立する。特にX線トポグラフィーに関し、放射光ビームライン源、高輝度高分解能線源、汎用線源の総合的な展開により、より高いレベルの解析と実効的な分析処理時間の確立を図り、基板評価、及び試作素子評価の効率化を行う。本技術確立によりSiC基板の結晶欠陥とデバイス特性劣化の相関解析を促進する。 | SiC素子の順方向特性、逆方向耐圧との相関付けを系統的に行うことにより、1mm□～3mm□のSiC素子において結晶欠陥が電気特性を劣化させるメカニズムを解明すると共に電流容量数10A/チップの性能を達成する条件を明らかにする。<br>　高い評価技術力を駆使し、伊丹サイトが担当する4インチウェハを用いたダイオード試作評価と連携して、プロセスコストの低減を図った高効率・高密度インバータ実現に向けての課題解決に資する。 | 5mm□のSiCスイッチング素子（DMOS）とDMOSの構成要素素子としてのPiNダイオードや、段階的にDMOS構造に近づく4種類のPN接合を同一基板上に作製して、それぞれのPN接合の耐圧歩留り及び微小VI特性の評価を行ない、耐圧劣化箇所を特定することにより、構造上の問題点を解明する。より、5mm□、100A級のSiC素子を達成するのにSiC基板に要求される欠陥種及び欠陥密度や素子構造及び製造プロセスの条件を明確にする。カーボンキャップ法により、プロセス欠陥を極力除去し、結晶欠陥と電気特性と相関付けを促進することでキラー欠陥を同定し、ウエハ企業へのフィードバックを行い、早期にSiC基板の品質の向上を図る。 |
| | ②-2 インバータ信頼性向上基盤技術 | 2インチSiC基板において、1mm□～3mm□のゲート酸化膜の信頼性評価素子を製造して、250℃まで昇温してタイムゼロでのゲート酸化膜の信頼性及び、長期信頼性をTDDB寿命で評価する技術を開発する。また、様々な転位欠陥の上に存在する酸化膜構造をTEMで調べる技術を確立する。 | 平成18年度までに開発された、ゲート酸化膜の製造技術及び信頼性寿命評価技術を用いて、タイムゼロでのゲート酸化膜の信頼性及び、長期信頼性寿命を測定する。様々な転位欠陥（基底面転位、螺旋転位、刃状転位等）上に存在する酸化膜構造をTEMにより観察して、転位がゲート酸化膜の信頼性寿命に与える影響を調べる。最終的に、1mm□～3mm□のSiC-MOSFETのゲート酸化膜を実用化するのに必要な信頼性寿命を得るための条件を明確にする。 | ゲート酸化膜の絶縁破壊電界分布（TZDB特性）や信頼性寿命（TDDB寿命）及びチャネル移動度を測定し、ゲート酸化膜の信頼性とチャネル移動度が両立するゲート酸化膜形成条件を明確にする。結晶欠陥を同定して、TZDB特性,TDDB寿命と対応づけして、5mm□、100A級のSiC DMOSを実用化するのに必要なゲート酸化膜の信頼性寿命（30年）を得るために必要なSiC基板の欠陥種及び欠陥密度を明確にする。<br>カーボンキャップ形成技術をイオン注入面のゲート酸化膜形成時の活性化熱処理技術に適用する。 |
| | ②-3 インバータ高パワー密度化基盤技術 | デバイスの低オン抵抗化、及び試作効率化のために必要な微細加工プロセスを確立する。またインバータ動作評価環境を整備し、50kW級の高出力性能の評価を可能として、SiC素子の性能を十分に活かしたインバータの設計・開発に資する。現有のインバータ損失設計シミュレータに組み込み、実験によりシミュレーションの妥当性を検証する。高速制御技術に関して、基礎技術を検討して課題を抽出するとともに，EMI対応技術に関して、ノイズフィルタ用インダクタの高周波PWM動作条件下での損失評価技術、および高周波特性の改善技術の研究を行う。 | 微細化プロセスの精度を高めて 600V-10A/チップ以上のSiC低損失MOSFET（オン抵抗：0.1Ω）とSBDダイオードの試作を行う。デバイス、電力変換回路、制御技術、フィルタの各パラメータの相互関係の解析も行い統合設計手法の研究を行い、これらの結果をベースにして、高パワー密度SiCインバータの実現に必要な条件を明らかにし、その見通しを明確にする。高速制御技術に関して、インバータシステム間の連携制御による瞬時的な電力の授受の制御を実現するための技術的指針を明らかにする。EMI対応技術に関して、高パワー密度SiCインバータの超高速スイッチングに起因する総合的なEMI障害の発生要因を分析・分類し、その課題解決のための基本技術確立への見通しを明確にする。 | S耐圧600-1200V級で10A/チップ以上のSiC低損失MOSFET（オン抵抗：0.1Ω級）とSBDを試作し、スイッチング特性、トータル損失低減効果など、各種特性を評価する。チップ自体の耐熱性を強化すると共にデバイス／電極接合の200℃耐熱化を進め、長時間特性の確認を行う。GaN HFETについても、10Aクラスのデバイスのプロセス検討・試作・評価を実施し、SiCパワーデバイスとの比較を行い、次世代インバータにおけるSiCデバイスの特徴を明確にする。インバータ高機能化の要となる高パワー密度インバータ高速連携制御技術、EMI対応技術など個別技術の指針を示した上で、それらを総合的に統合してインバータ性能の限界を追求する限界設計技術を適用し、最終目的である高パワー密度($50W/cm^3$以上)のSiCインバータを実現するのに必要な条件を明らかにし、その見通しを明確化する。 |

図表Ⅱ-3.　研究開発項目の研究課題と担当研究グループ

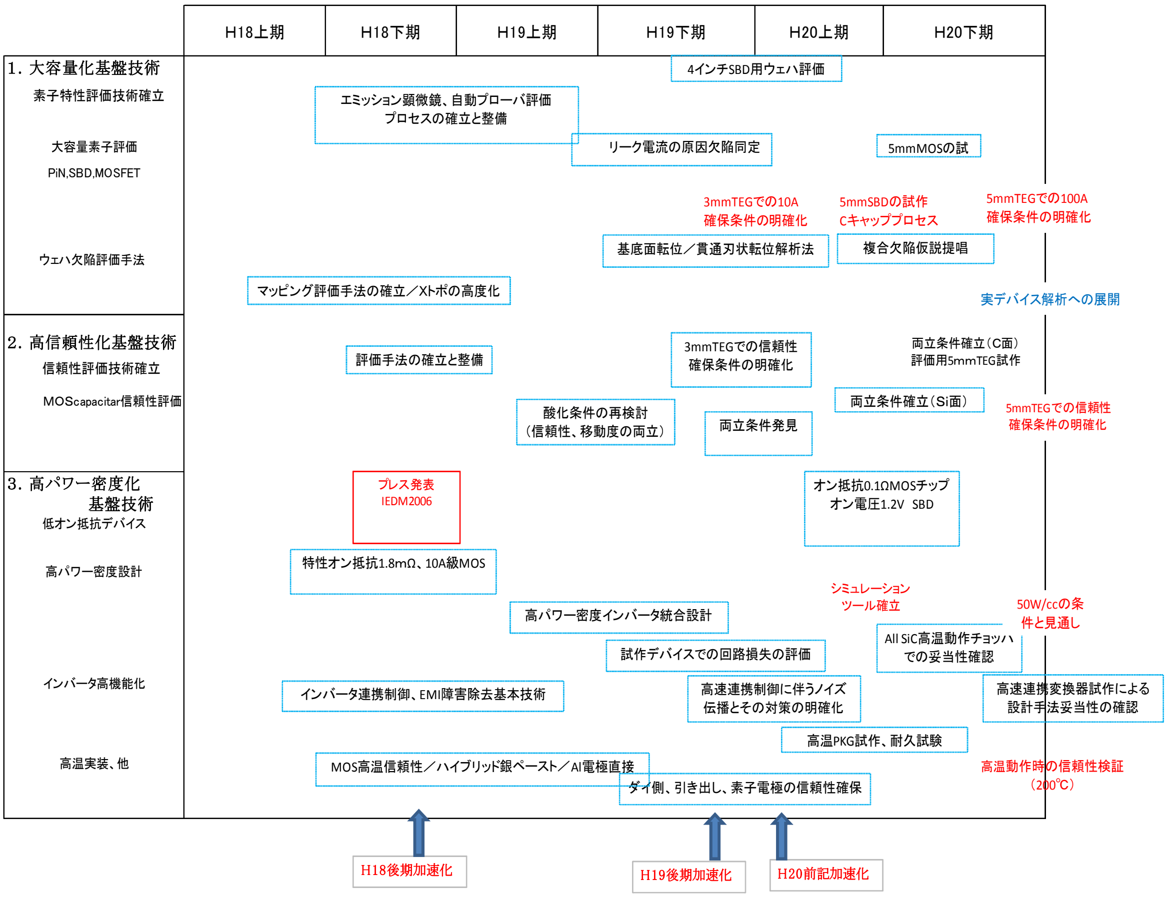
＜伊丹サイトの開発スケジュール＞

図表Ⅱ-4.　伊丹サイトの開発スケジュール

| | 平成18年度（2006） | 平成19年度（2007） | 平成20年度（2008） |
|---|---|---|---|
| 高効率・高密度インバータユニット技術開発 | セル構造微細化検討→<br>動特性評価、駆動法検討→ | 素子構造最適化→<br>kW級インバータ評価 限界性能検証、並列駆動技術→<br>高キャリア動作基礎評価→ | 素子、モジュール試作→<br>14kVAインバータ試作評価→<br>高キャリア動作効果検証→ |
| 高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発 | | 基板評価法検討→ | 4インチ基板SBD試作評価→ |
| | | <br>3.7kW | <br>14kVA（11kW） |

＜つくばサイトの開発スケジュール＞

図表Ⅱ-5.　つくばサイトの開発スケジュール




（再委託）

＜１＞テーマ名：「デバイス作製プロセス起因欠陥の評価／インバータ設計最適化技術の開発」

再委託先：（財）電力中央研究所（業務責任者：上席研究員　土田修一）

＜２＞ 再委託研究内容

１）． デバイス作製プロセス起因欠陥の評価　（材料科学研究所，横須賀地区）

①電中研保有の結晶評価技術を適用し，パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発においてプロセス加工を行った SiC 試料について，プロセス起因欠陥を検出する。

②電中研保有の結晶評価技術を適用し，パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発において試作された SiC TEG デバイスについて，プロセス加工におけるプロセス起因欠陥を検出する。

③電中研保有の結晶評価技術を適用し，パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発においてイオン注入/アニール処理を施した SiC 試料について，プロセス起因欠陥の定量評価，プロセス条件依存性解析を行うことにより，同種欠陥密度の低減条件を明らかにする。

２）．インバータ設計最適化技術の開発（システム技術研究所，狛江地区）

①パワーエレクトロニクス機器用途毎のインバータ要求仕様（定格容量，出力電圧等）

の

明確化。

以下のパワーエレクトロニクス機器を対照とする。

イ．需要側機器（分散形電源連系用，電力貯蔵装置用，電力品質調整用，産業用モータードライブ，通信・情報機器電源，PHEV/EV 用，エコキュート用，IH 用，エアコン用，等）

ロ．電力供給システム用機器（分散形電源連系用，電圧・無効電力調整用，ループコントローラ用，等）

②上記用途毎の電力変換（インバータ）設計最適化のための評価指標の明確化。

③インバータ性能評価指標に対応した設計（トポロジー，素子構成，スイッチング周波数，等）最適化手順とビルディングブロック構築手順の明確化。

④シミュレーションツールを使用したインバータ設計最適化検討の準備作業と試計算。

⑤インバータシミュレーションツールを用いて，パワーデバイスを含む各種パラメータを変化させた場合の損失およびスイッチング過電圧を解析し，パワーデバイス設計へのフィードバックを含め，パラメータ解析によるインバータ設計最適化が実用的に機能することを検証する。

⑥電力ネットワークや負荷機器を考慮したパワーエレクトロニクスシステム設計とインバータ自体の高パワー密度化を主眼とする実装設計との協調方法を整理し，統合的なインバータ設計最適化技術の構造を明確にする。

（共同実施）

＜１＞テーマ名：「SiC デバイス実装に対応可能なハイブリッド銀ペーストの開発」

共同実施先：大阪大学（菅沼克昭教授）

【共同実施内容】

①ハイブリッド銀ペーストの設計及び接続制御技術の開発

SiC や GaN などパワー半導体チップの接続に使用する銀ペーストには、低抵抗、耐熱性に加え、上下アタッチメント間の高効率の応力緩和や熱伝達が必要条件になる。これらの条件を満たすためにナノ粒子を主とするペーストやサブミクロンからミクロンオーダーの銀粉を銀ナノ粒子で結束させポーラス構造を形成するハイブリッド銀ペーストの適用が考えられる。

本開発では、主としてハイブリッド銀ペーストを用い、200～250℃で有機物を取り除き、銀ナノ粒子をサイズ効果で低温焼結させることでポーラス構造の接続を形成する。銀ペーストとして供給される材料の接続特性を銀粉や銀ナノインクを用いて改質し、銀ナノ粒子間、銀ナノ粒子－銀粉間および接続界面のナノ構造の解明、改善技術の指針を確立する。

平成 18、19 年度はポーラス構造形成に適した各種ナノ物質の合成及びハイブリッド銀ペースト調製条件の検討を行う。平成 20 年度は、これらの新規材料の合成条件やプロセス条件をパラメータとし、各パラメータの銀ポーラスおよび界面形成における影響を解明し、ダイアタッチ構造の熱特性を最適化する。

②ハイブリッド銀ペースト接続の安定界面基礎設計及び熱・力学的信頼性評価技術の確立

ハイブリッド銀ペーストは銀ナノ粒子－チップ及び基板のめっき材料間で融着、焼結が進行し、最終的に接続構造が形成される。しかし、これらの材料間の結合は未知の部分が多く、せん断強度、耐衝撃強度評価法の確立および評価を実施し、ハイブリッド銀ペーストと各種めっきとの接続特性の評価及びその接続機構の解明に取り込む。また、新たな銀ポーラス構造の熱伝達特性評価方法の確立及び制御技術を開発すると共に、特に問題となる SiC や GaN チップと銀ポーラス構造の接続界面における不均一応力分布よるチップ損傷への影響を明らかにする。

＜２＞テーマ名：「電力変換システムとその応用に関する研究」

共同実施先：東京工業大学（赤木 泰文教授）

【共同実施内容】

①6.6kV トランスレス・エネルギー貯蔵システムの研究

リチウム・イオン電池の使用を前提した高性能エネギー貯蔵システムを開発する。これはカスケード PWM 変換器を使用し，6.6kV 系統に直結できる点に特長がある。平成１９年度までは蓄電デバイスとして電解コンデンサを使用し、その動作原理を実験によって確認した。平成２０年度はニッケル水素電池を使用し，電気絶縁した複数台のニッケル水素電池の SOC(Stae-Of-Charge: 電池残存量)バランス制御を開発し，200V，10kW ミニモデルを設計・製作し，SOC バランス制御の有効性を実証する。

②双方向絶縁形 DC/DC コンバータを使用とした 6.6kV 配電系統用 BTB システムの基礎研究

これは上記１）の研究を発展させたもので，カスケード PWM 変換器の直流リンクに双方向絶縁形 DC/DC コンバータを接続したユニークなシステム構成に特長がある。

平成 18 年度と 19 年度においては，そのコア回路として使用するコンバータセルの基本設計と動作検証を行う。平成２０年度においては、製作したハードウェアとソフトウェアの改良を行い、更なる特性改善を目指す。

③次世代 6.6kV 配電系統用 BTB システムの基礎研究

双方向絶縁形 DC/DC コンバータをベースとした，次世代 6.6kV 配電系統用 BTB システムの基礎研究を行う。これは上記１）のカスケード PWM 変換器の直流リンクに，当研究室で以前に開発した双方向絶縁形 DC/DC コンバータを接続する。本

研究では，その基礎研究としてコンバータセルを設計・製作し，設計の妥当性を検証する。

＜３＞テーマ名：「SiC インバータ EMI 対応技術の研究開発」

共同実施先：首都大学東京（清水敏久教授）

【共同実施内容】

高パワー密度 SiC インバータの超高速スイッチングに起因する総合的な EMI 障害の発生要因を分析・分類し、その課題解決のための基本技術確立への見通しを明確にする。インバータから外部に及ぼす EMI 障害と、スイッチングノイズに伴い生じる内部 EMI の両者について、研究を実施する。

＜４＞テーマ名：「SiC インバータ高速制御技術の研究開発」

共同実施先：千葉大学（佐藤之彦教授）

【共同実施内容】

電力変換システムにおけるエネルギー蓄積要素や受動素子の小型化に向けて，インバータシステム間の連携制御による瞬時的な電力の授受の制御を実現するための技術課題を抽出し，その解決に向けた技術的指針を明らかにする。

平成１８年度にはインバータの連携制御の基礎となる高速応答が可能な電流制御に関する基礎技術を検討して術課題を抽出し，その解決に向けた技術的指針を明らかにする。

平成１９年度には電力変換システムにおけるエネルギー蓄積要素や受動素子の小型化に向けて，インバータシステム間の連携制御による瞬時的な電力の授受の制御を実現するための技術課題を抽出し，その解決に向けた技術的指針を明らかにする。

<5>テーマ名：「フォトルミネッセンスによる SiC ウェハの欠陥評価」

共同実施先：宇宙航空研究開発機構(田島道夫 研究主幹)

【共同実施内容】

高度評価法によるウェハ欠陥の位置や形状、特性との対高度評価法によるウェハ欠陥の位置や形状、特性との対応から、TZDB 特性,TDDB 寿命との対応づけしてキラー欠陥を同定する。つくばサイトで作製された SiC デバイス TEG 等をフォトルミネッセンスマッピング法評価し、その欠陥を解析する。

<6>テーマ名「SiC デバイス欠陥の EBIC 法による評価」

共同実施先：物質･材料研究機構（関口隆史　半導体特性評価グループ　グループリーダ）

【共同実施内容】

高度評価法によるウェハ欠陥の位置や形状、特性との対高度評価法によるウェハ欠陥の位置や形状、特性との対応から、TZDB 特性,TDDB 寿命との対応づけしてキラー欠陥を同定する。つくばサイトで作製された SiC デバイス TEG 等を EBIC 法で評価し、その欠陥を解析する。

2.2 研究開発の実施体制

2.2.1 実施事業者

１．高効率・高密度インバータユニット技術開発

三菱電機 株式会社

２．高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発

独立行政法人 産業技術総合研究所

財団法人　新機能素子研究開発協会

2.2.2 実施体制

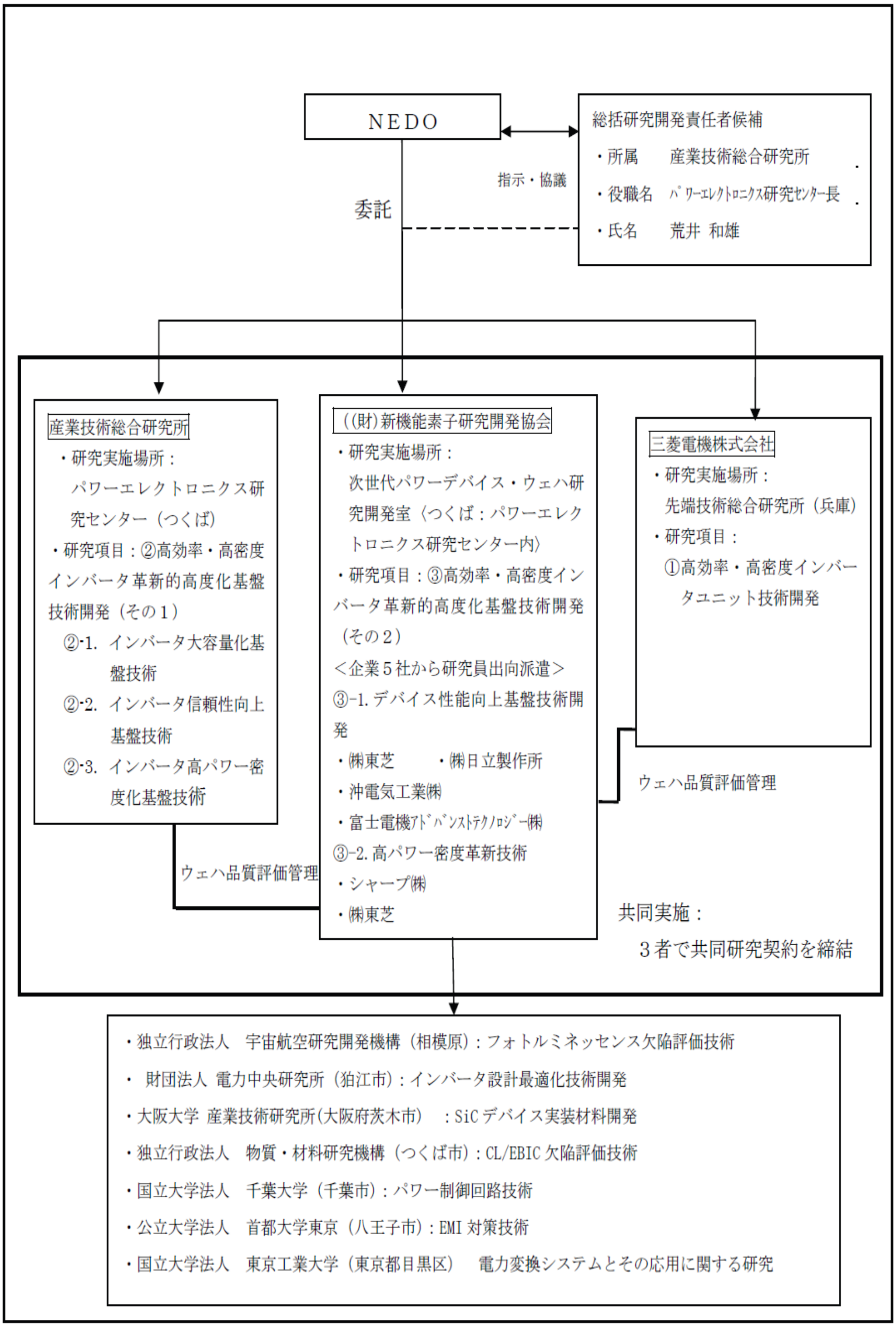
＜全体＞

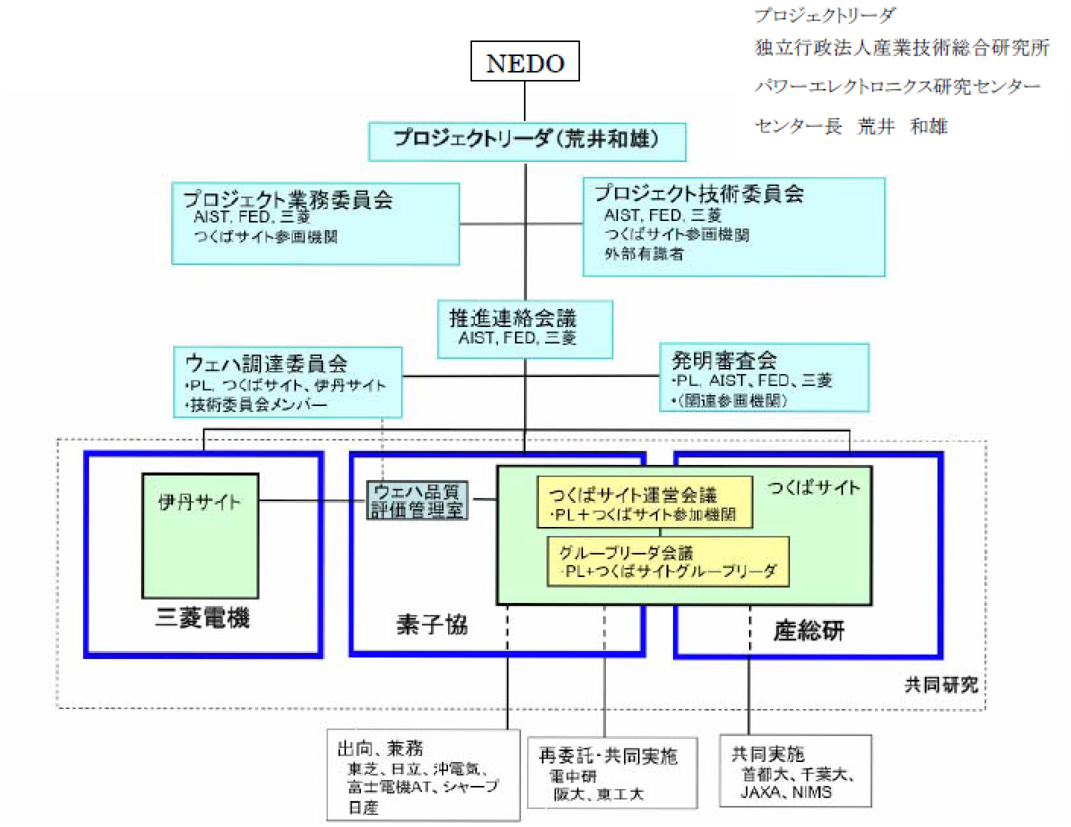
(次頁)

図表Ⅱ-6.「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」実施体制

実施体制

「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」実施体制






図表Ⅱ−7.　　実施体制

2.2.3 研究の場所

　　　　①　テーマ「高効率・高密度インバータユニット技術開発」

　　　　　兵庫県尼崎市塚口本町８丁目１番１号

　　　　　三菱電機 株式会社 先端技術総合研究所内

　　　　②テーマ「高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発」

　　　　　茨城県つくば市梅園１－１－１、中央第２

　　　　　独立行政法人 産業技術総合研究所

　　　　　パワーエレクトロニクス研究センター 内

　　　　　(H20 年度よりエネルギー半導体エレクトロニクスラボに改称)

2.2.4 主任研究者

①　テーマ「高効率・高密度インバータユニット技術開発」

三菱電機㈱　先端技術総合研究所　デバイス技術部門統轄　大森 達夫

②　テーマ「高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発」

(独) 産業技術総合研究所　　エネルギー半導体エレクトロニクスラボ ラボ長　奥村

元

（財）新機能素子研究開発協会　研究開発統括部長　　　　清水 肇

2.2.5 研究者（１）三菱電機株式会社

| | | | |
|---|---|---|---|
| 委託先等名 | 三菱電機株式会社 | | |
| 業務管理者 | 先端技術総合研究所　デバイス技術部門統轄 | | 大森　達夫 |
| 経理責任者 | 先端技術総合研究所　総務部　経理課長 | | 中川　正男 |
| 研究開発責任者 | 先端技術総合研究所　デバイス技術部門統轄 | | 大森　達夫 |
| 研究実施場所<br>および<br>登録研究員 | 三菱電機株式会社　先端技術総合研究所<br>〒661-8661　兵庫県尼崎市塚口本町八丁目１番１号<br>（最寄り駅：ＪＲ宝塚線 猪名寺駅） | | |
| | 氏名 | 所属・役職 | 主な担当事業内容 |
| | 大森　達夫 | デバイス技術部門統轄兼SiCデバイス開発プロジェクトグループ・プロジェクトマネージャー | 1）、5） |
| | 高見　哲也 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ・サブプロジェクトマネージャー | 1）、5） |
| | 今泉　昌之 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　ﾃﾞﾊﾞｲｽ要素技術ｸﾞﾙｰﾌﾟ・ｸﾞﾙｰﾌﾟﾏﾈｰｼﾞｬｰ | 1）、5） |
| | 炭谷　博昭 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　ﾃﾞﾊﾞｲｽ実証ｸﾞﾙｰﾌﾟ・ｸﾞﾙｰﾌﾟﾏﾈｰｼﾞｬｰ | 1）、5） |
| | 渡辺　昭裕 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　ﾃﾞﾊﾞｲｽ実証ｸﾞﾙｰﾌﾟ・主席研究員 | 1） |
| | 中田　修平 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　実証ｸﾞﾙｰﾌﾟ・主席研究員 | 1） |
| | 黒田　研一 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　ﾃﾞﾊﾞｲｽ実証ｸﾞﾙｰﾌﾟ・主席研究員 | 1） |
| | 大塚　健一 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　ﾃﾞﾊﾞｲｽ実証ｸﾞﾙｰﾌﾟ・主席研究員 | 1） |
| | 油谷　直毅 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　ﾃﾞﾊﾞｲｽ実証ｸﾞﾙｰﾌﾟ・主席研究員 | 1）、2)-2 |
| | 綾　　淳 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　ﾃﾞﾊﾞｲｽ実証ｸﾞﾙｰﾌﾟ・主席研究員 | 1）、2)-2 |
| | 渡辺　寛 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　ﾃﾞﾊﾞｲｽ実証ｸﾞﾙｰﾌﾟ・主席研究員 | 1）、2)-2 |
| | 古庄　智明 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　ﾃﾞﾊﾞｲｽ実証ｸﾞﾙｰﾌﾟ・研究員 | 1）、2)-2 |
| | 中尾　之泰 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　要素技術ｸﾞﾙｰﾌﾟ・主席研究員 | 1） |
| | 三浦　成久 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　要素技術ｸﾞﾙｰﾌﾟ・主席研究員 | 1） |
| | 吉田　昌平 | SiCデバイス開発プロジェクトグループ　要素技術ｸﾞﾙｰﾌﾟ・研究員 | 1） |
| | 小山　正人 | パワエレシステム開発センター・センター長 | 1）、5） |
| | 大井　健史 | パワエレシステム開発センター デバイス応用技術グループ・グループマネージャー | 1）、5） |
| | 木ノ内　伸一 | パワエレシステム開発センター デバイス応用技術グループ・主席研究員 | 1） |
| | 碓井　修 | パワエレシステム開発センター デバイス応用技術グループ・主席研究員 | 1） |
| | 中武　浩 | パワエレシステム開発センター デバイス応用技術グループ・研究員 | 1） |

1)　　高効率・高密度インバータユニット技術開発
2)-1　インバータ大容量化基盤技術の研究
2)-2　インバータ大容量化基盤技術の研究
　　　（４インチウェハ評価、及びそれを用いたダイオード試作・評価）
3)　　インバータ信頼性向上基盤技術の研究
4)　　インバータ高パワー密度化基板技術の研究
5)　　研究開発進捗管理及び結果の取りまとめ･分析・報告

（２）独立行政法人 産業技術総合研究所

| PL | 荒井　和雄 | 産業技術総合研究所　イノベーション推進室 | |
|---|---|---|---|
| 委託先等名 | 独立行政法人　産業技術総合研究所 | | |
| 業務管理者 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ<br>研究ラボ長　　奥村　元 | | |
| 経理責任者 | 財務会計部門　経理室長　杉田　実 | | |
| 研究実施場所及び登録研究員 | 独立行政法人　産業技術総合研究所、つくばセンター<br>〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1、中央第２<br>（最寄り駅：つくばエクスプレス　つくば駅） | | |
| | 氏　名 | 所属・役職 | 担当事業内容（＊） |
| | 荒井和雄 | イノベーション推進室 技術顧問（ＰＬ） | 5),6) |
| | 奥村　元 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、研究ラボ長 | 5),6) |
| | 大橋弘通 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、プロジェクトマネージャー | 4),5),6) |
| | 福田憲司 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、SiC パワーデバイス技術統括 | 2)-①,3),4),5),6) |
| | 樋口　登 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、スーパーデザイン･ネットワーク研究班、主任研究員 | 4),5),6) |
| | 松畑洋文 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、ウェハ･評価技術統括 | 2),3),5), 6) |
| | 山口　浩 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、副研究ラボ長 | 4),5),6) |
| | 山口博隆 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、ウェハ･評価研究班、主任研究員 | 2),3),6) |
| | 八尾　勉 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、招聘研究員 | 2)-①,3),4),6) |
| | 田中保宣 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、SiC パワーデバイス研究班、主任研究員 | 2)-①,6) |
| | 大久保雅隆 | 計測フロンティア研究部門、副研究部門長 | 2)-①,3),4),6) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 板谷太郎 | 計測フロンティア研究部門、超分光システム開発研究グループ、主任研究員 | 2)－①，3)，4)，6) |
| | 小杉亮治 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、SiC パワーデバイス研究班、主任研究員 | 2)-①,6) |
| | 先崎純寿 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、SiC パワーデバイス研究班、主任研究員 | 3),6) |
| | 原田信介 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、SiC パワーデバイス研究班、研究員 | 4),6) |
| | 岡本光央 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、SiC パワーデバイス研究班、研究員 | 4),6) |
| | 木下明将 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、SiC パワーデバイス研究班、特別研究員 | 2)-①,4),6) |
| | 林　祐輔 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、スーパーデザイン･ネットワーク研究班、研究員 | 4),6) |
| | 郎　豊群 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、スーパーデザイン･ネットワーク研究班、特別研究員 | 4),6) |
| | 金城達人 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、スーパーデザイン･ネットワーク研究班、特別研究員 | 4),6) |
| | Rejeki Simanjorang | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、スーパーデザイン･ネットワーク研究班、特別研究員 | 4),6) |
| | 和田桂典 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、ウェハ･評価研究班、テクニカルスタッフ | 2)-①,3) |
| | 加藤　真 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、SiC パワーデバイス研究班、テクニカルスタッフ | 2)-①,3),4) |
| | 梅沢　正 | エネルギー半導体エレクトロニクス研 | 2)-①,3),4) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | 究ラボ、SiC パワーデバイス研究班、テクニカルスタッフ | |
| | 大和田好蔵 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、スーパーデザイン･ネットワーク研究班、テクニカルスタッフ | 4),6) |
| | 彦坂憲宣 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、テクニカルスタッフ | 2)-①,3),4) |
| | 鈴木賢二 | エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ、SiC パワーデバイス研究班、テクニカルスタッフ | 2)-①,3),4) |

（＊）担当事業内容

1）高効率･高密度インバータユニット技術開発

2）インバータ大容量化基盤技術の研究

　① 次項②以外

　② ４インチウェハ評価、及びそれを用いた４インチを用いたダイオード試作・ 評価

3）インバータ信頼性向上基盤技術の研究

4）インバータ高パワー密度化基盤技術の研究

5）研究開発進捗管理及び結果の取りまとめ・分析・報告

6）関連技術及び特許動向調査

（４）共同実施先における研究体制

①首都大学東京

| | | | |
|---|---|---|---|
| 共同実施先等の名称 | 公立大学法人　首都大学東京 | | |
| 研究実施場所及び登録研究員 | 公立大学法人　首都大学東京　南大沢キャンパス<br>〒192-0397　東京都八王子市南大沢 1-1<br>（最寄り駅：京王線相模原線　南大沢駅） | | |
| | 氏　名 | 所属・役職 | 担当事業内容 |
| | ▽清水敏久 | 理工学研究科､電気電子工学専攻　教授 | 4)， 6) |

実施内容：SiC インバータ EMI 対応技術の研究開発を行う。

②千葉大学

| | |
|---|---|
| 共同実施先等の名称 | 国立大学法人　千葉大学 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 研究実施場所及び登録研究員 | 国立大学法人　千葉大学　西千葉キャンパス<br>〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33<br>（最寄り駅：総武本線　西千葉駅） | | |
| | 氏　名 | 所属・役職 | 担当事業内容 |
| | ▽佐藤之彦 | 工学部電子機械工学科、教授 | 4)，6) |

実施内容：SiC インバータ高速制御技術の研究開発を行う。

③宇宙航空研究開発機構

| | | | |
|---|---|---|---|
| 共同実施先等の名称 | 独立行政法人　宇宙航空研究開発機構 | | |
| 研究実施場所及び登録研究員 | 独立行政法人　宇宙航空研究開発機構　相模原キャンパス<br>〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1<br>（最寄り駅：横浜線　淵野辺駅） | | |
| | 氏　名 | 所属・役職 | 担当事業内容 |
| | 田島道夫 | 宇宙科学研究本部　宇宙探査工学研究系、研究主幹 | 2)-①，3)，6) |

実施内容：つくばサイトで作製された SiC デバイス TEG 等をフォトルミネッセンスマッピング法で評価し、その欠陥を解析する。

④物質･材料研究機構

| | | | |
|---|---|---|---|
| 共同実施先等の名称 | 独立行政法人　物質･材料研究機構 | | |
| 研究実施場所及び登録研究員 | 独立行政法人　物質･材料研究機構　並木地区<br>〒305-0044 茨城県つくば市並木 1-1<br>（最寄り駅：つくばエクスプレス　つくば駅） | | |
| | 氏　名 | 所属・役職 | 担当事業内容 |
| | 関口隆史 | 情報通信材料研究領域、半導体特性評価グループ、グループリーダ | 2)-①，3)，6) |
| | 陳斌 | 情報通信材料研究領域、半導体特性評価グループ、NIMS ジュニア研究員 | 2)-①，3)，6) |

実施内容：つくばサイトで作製された SiC デバイス TEG 等を EBIC 法で評価し、その欠陥を解析する。

（3）財団法人　新機能素子研究開発協会

| | | | |
|---|---|---|---|
| PL | 荒井　和雄 | 産業技術総合研究所<br>イノベーション推進室　技術顧問 | |
| 委託先等の名称 | 財団法人　新機能素子研究開発協会 | | |
| 業務管理者 | 研究開発統括部長　清水　肇 | | |
| 経理責任者 | 総務部経理課　経理課長　加藤良武 | | |
| 研究実施場所及び登録研究員 | 財団法人 新機能素子研究開発協会<br>〒105－0001　東京都港区虎ノ門２丁目９番 14 号 発明会館５階 | | |
| | 氏　名 | 所属・役職 | 担当事業内容（*） |
| | 清水　肇 | 研究開発部　研究開発統括部長<br>兼<br>次世代インバータ基盤技術研究所長 | 5),6) |
| | 渡井久男 | 研究開発部　研究開発第一部長 | 2),3),4),<br>5),6) |
| | | | |
| つくばサイト | | | |
| 業務管理者 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室長　兼　ウェハ品質管理室長　　　樋口 登 | | |
| 研究実施場所及び登録研究員 | （独）産業技術総合研究所<br>〒305－8568<br>茨城県つくば市梅園 1－1－1　中央第２<br>エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ内<br>次世代インバータ基盤技術研究所 | | |
| | 氏名 | 所属・役職 | 担当事業内容（*） |
| | 一ノ関共一 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>ウェハ品質評価管理室　主任研究員 | 2),3) |
| | 小坂賢一 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>ウェハ品質評価管理室　主任研究員 | 2),3) |
| | 田中美恵子 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>ウェハ品質評価管理室　主任研究員 | 2),3) |
| | 横山　夏樹 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主幹研究員 | 2)-①,3),6) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 鳥居　和功 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主幹研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 大野　俊之 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主幹研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 大柳　孝純 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 吉江　徹 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 内田　英次 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主幹研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 小林　元樹 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主幹研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 坂田　豊和 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 作野　圭一 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主幹研究員 | 4), 6) |
| | 川村　博史 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 4), 6) |
| | ｼﾞｮﾝ･ﾄﾜｲﾅﾑ | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 4), 6) |
| | 四戸　孝 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主幹研究員 | 2)-①,3),<br>4), 6) |
| | 畠山哲夫 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主幹研究員 | 2)-①,3),<br>5), 6) |
| | 河野　洋志 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 鈴木　拓馬 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 湯元　美樹 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 米澤 喜幸 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主幹研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 中村 俊一 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3), 6) |
| | 後藤 雅秀 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3), 6) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 田森 妙 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3)，6) |
| | 田沼良平 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主幹研究員 | 2)-①,3)，6) |
| | ▽樋口 登 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室長<br>兼　ウェハ品質管理室長 | 2)-①,3)，<br>4),5)，<br>6) |
| | 谷本　智 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主幹研究員 | 4)，6) |
| | 高尾和人 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 4)，6) |
| | 南　章行 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3)，6) |
| | 福田浩一 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3)，6) |
| | 新里昌弘 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①,3)，6) |
| | 渡邊 寛 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>ウェハ品質評価管理室　主任研究員 | 2)-② |
| | 辻　　崇 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①，6) |
| | 下里　淳 | 次世代インバータ基盤技術研究所<br>技術開発室　主任研究員 | 2)-①，3) |

2.3 研究開発の運営管理

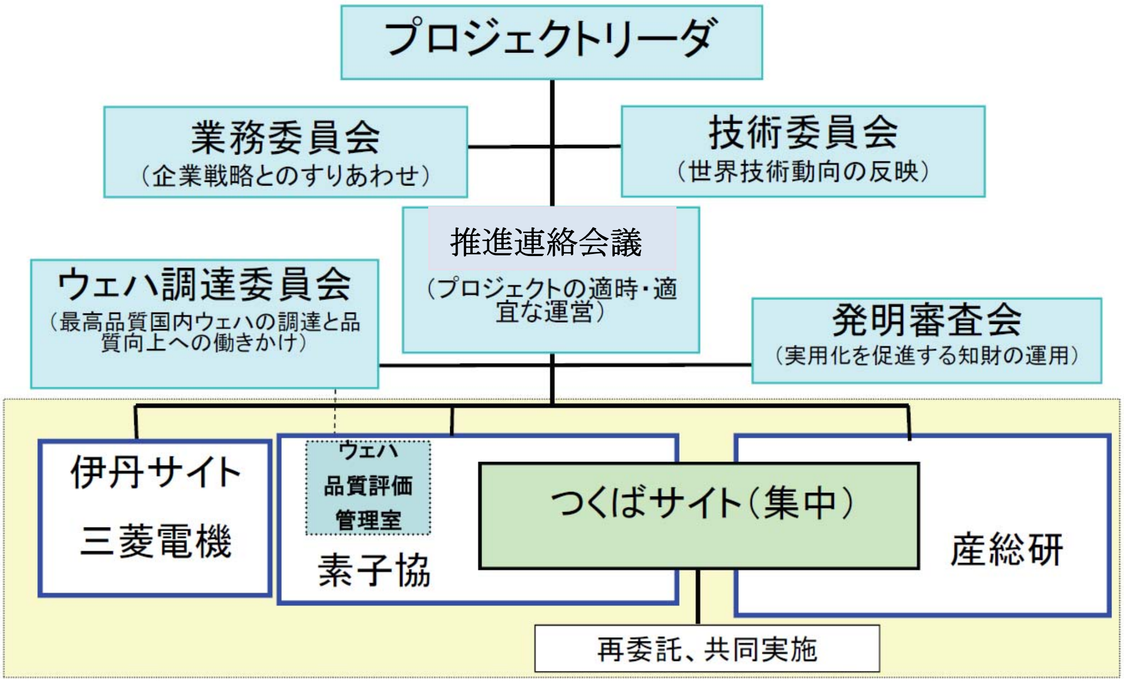
三菱電機㈱、(独)産業技術総合研究所、(財) 新機能素子研究開発協会の３者の「共同研究契約書」を元に、「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発事業研究体運営規程」、「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発事業研究体知的財産権取扱規程」を設けて運営管理を行った。

推進連絡会議

（プロジェクトの適時・

適宜な運営）

＜プロジェクト実施運営体制図＞




図表Ⅱ-8. プロジェクト実施運営体制図

2.3.1 研究開発管理

(a) 基本事項の決定

推進連絡会議にて決定。

(b) 業務委員会、技術委員会による研究開発計画に対するステアリング

業務委員会における参加企業各社の業務委員、技術委員会におけるプロジェクト外有識者委員の意見を考慮しプロジェクトの方向を決定。

(c) 研究開発の管理運営

週１回の定例技術検討会、つくばサイト参加企業のリーダーと共同実施者も含めたつくばサイト会議、研究課題毎のミーティングを行い、進捗をフォローすると共に、SiC ウェハの品質管理と購入計画、ウェハメーカー、エピメーカとの技術情報の交換と議論をウェハ調達委員会で行う。

(e) 成果管理

成果の外部への発表、特許出願に関してはプロジェクトリーダーの承認のもと、決められた手順にもとづいて行われる。特許出願に関して発明者やその持分について議論の必要な場合のみ、発明審査会を PL が招集する。

2.3.2 成果報告

成果の報告、議論は１回／週の定例会等研究グループ毎に行い、２回／年のプロジェ

クト技術委員会の前に結論に向けた議論を行う。

2.3.3 業務管理

業務管理はNEDO技術開発機構との契約者である三菱電機㈱、(独)産業技術総合研究所、(財)新機能素子研究開発協会それぞれの予算管理部門で実施。

3. 情勢変化への対応

【加速財源投入実績】

（１）平成１８年度

①件名

高効率・高密度インバータユニット技術の開発促進のための露光装置と高輝度 X 線分析装置の購入

②金額：３３５百万円

③目的・必要性

世界で最小のオン抵抗値を持つIEMOSFETの開発・実証を行ったことから、更にSiCウェハの結晶欠陥低減に資するデバイスの特性分析とデバイス製造要素技術の高度化を図る。

④成果

SiC素子化に必要な露光装置と高輝度X線分析装置の導入により、電気特性と結晶欠陥の対応付けが加速されたことにより、デバイスキラー欠陥が明らかになりつつあり、プロジェクト目標達成が加速されている。

（２）平成１９年度

①件名

高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術の開発促進のための４インチウェハ、インライン４インチウェハ評価設備、インバータ動作評価装置の購入

②金額

２４０百万円

③目的・必要性

確立した SiC 基板欠陥評価方法を用いて、４インチウェハ評価を実施し、三菱電機において、ダイオード試作評価を実施する。これにより、素子特性を劣化させるメカニズム解明に資する共に、実用化のためのプロセスコストの低減を図った高効率インバータ実現に向けての課題解決に資する。

また、フィルター等の小型化が期待できるインバータの高キャリア周波数化に関し評価検討を行い、その効果を検証する。

④成果

国産の 4 インチウェハが米国 Cree 社製と同等の品質との評価結果を得た。また、4インチウェハ上デバイス試作の加速としてインライン評価が可能な4インチ対応プロセスを準備すると共に、SiC インバータ回路の高周波動作評価を行った。

（3）平成２０年度

①件名

高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術の開発促進のためのカーボンキャップ装置の購入

②金額８５百万円

③目的・必要性

SiC を用いたインバータ実用化に向けては、材料欠陥・プロセス起因欠陥の低減によるデバイスの歩留まり信頼性向上が求められており、そのための基盤技術の確立を図るためにもプロセス起因欠陥においては、イオン注入後に行う活性化熱処理によるウェハ表面荒れが最も大きな課題であった。これを回避できる手法を確立する。

④成果

SiC デバイスプロセスのボトルネックであった活性化熱処理に関し、カーボン保護膜で表面荒れを抑制できるプロセスを見出し、100A 級 SiC-SBD や 10A 級 SiC-MOSFET（IE-

MOS)の試作に成功した。IEMOS については、加速資金で導入したカーボンキャップ装置による耐圧歩留まり向上を確認し、インバータ回路での評価に使用する 10A 級 IEMOS

を製作した。

４．評価に関する事項

技術的及び産業政策的観点から見た技術開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等の観点から、外部有識者による技術開発の事後評価を平成 21 年度までに実施する。

Ⅲ．　研究開発成果について

1．事業全体の成果

（1）　高効率・高密度インバータユニット技術開発

素子耐圧安定化を目的に終端構造の最適化検討を行い、1700V 以上の耐圧を有する SiC-MOSFET、SBD を試作実証した。また SiC-MOSFET の大容量化検討として素子面積 5mm□の MOSFET 及び SBD を試作し、100A のスイッチング動作を確認した。　また、パワーデバイスとしての限界特性評価の一環として、MOSFET に対して短絡時の評価を実施し、現状パワーデバイスにおいて標準的な 10μsec 以上であることを確認した。並列モジュール（30A 級）を用いて、実際にモータ駆動試験を実施してパ

ワー密度は 10W/cc を達成し、損失が 11ｋW 出力時に Si-IGBT インバータユニットの 30％であることを確認し、最終目標を達成した。高キャリア周波数化については、インンバータユニットにおいて 30ｋHz 高キャリア動作を達成した。

（２） 高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術

(2)-1.インバータ大容量化基盤技術の研究

①放射光トポグラフ法による転位欠陥評価技術

転位欠陥の性状を非破壊で評価する手法を開発し、基底面螺旋転位、基底面刃状転位の区別をつけることが可能となった。観察される特長的な転位のコントラストの原因についての考察も行いメカニズムを明確にした。

②大容量 SBD の開発と耐圧劣化機構

ウエハ起因とプロセス起因の課題解決の両面から研究開発を進め、活性化熱処理工程で耐圧不良が起こる問題は、活性化熱処理時にカーボンキャップを被せる方法により解決した。耐圧 1200Ｖで 5ｍｍ□100Ａ級ＪＢＳ－ＳＢＤの試作に成功した。歩留り低下の原因はエピタキシャル層の欠陥であることを明らかにした。

③PiN ダイオードの耐圧不良機構

高ドーズ Al 注入により逆方向特性の劣化（高リーク電流および低絶縁耐圧）が見られた。高リーク電流を示す素子での発光点は貫通螺旋転位と一致した。

④大容量 DIMOS の開発と耐圧劣化機構

現状での耐圧歩留まりの低下はプロセス要因が支配的であることを示唆された。特に、活性化熱処理工程においては、高温・短時間の活性化アニール処理が耐圧歩留まり改善に有効であることを確認した。リーク電流が比較的大きい値を示す素子と転位密度の間には明確な相関関係が見られた。貫通螺旋転位については、懸念すべき欠陥ではあるが、市販の SiC ウエハに存在する貫通螺旋転位密度程度であれば、実用上ほぼ問題ないレベルである。

(2)-2. インバータ信頼性向上基盤技術の研究

①（000１）Si 面上の高チャネル移動度と高信頼性ゲート酸化膜

製造工程で、(0001) Si 面ではドライ酸化の後に N2O と H2 アニールを行うことが、高信頼性と高チャネル移動度を両立させる。この条件でのチャネル移動度は、30.7ｃ$m^2$/Vs となり、最も高い。SiC ウエハの欠陥としては、エピタキシャル成長中に発生する欠陥がキラーとなることがわかった。基底面転位と螺旋転位では、かなりの高い確率でゲート酸化膜の破壊が発生するが、致命的ではない。寿命は TDDB 測定により、30 年を十分に超えている。5mm□の 3MV/cm での TDDB 寿命は、30 年を超えることが分かり、転位密度が約 9000 個/$cm^2$以下の SiC 基板上に欠陥が非常に少ない高品質エピタキシャル層を形成できれば 5mm□のゲート酸化膜においても 30 年の長期信頼性寿命を保証できると考えられる。

②（000-1）C 面上の高チャネル移動度と高信頼性ゲート酸化膜

5mm 角以上の大面積のゲート酸化膜の寿命は主にゲート酸化プロセスと表面欠陥密度によって支配されており、高信頼化にはゲート酸化プロセスのさらなる最適化と、表面欠陥密度、特に“ダウンフォール”、“三角欠陥”の低減が必須である。C 面においては、螺旋転位や刃状転位などの結晶欠陥との強い相関は認められなかった。

以上に加え、ウ エハの一括管理により、ウエハ情報を早期にメーカーへ開示し、ウエハ産業の育成に貢献した。

(2)-3. インバータ高パワー密度化基盤技術

インバータ損失統合設計シミュレータによるインバータ出力パワー密度予測を行い、50W/cc 以上の高パワー密度化への条件を定量的に検討できる手法を開発した。高パワー密度インバータの実証を行うために SiC-MOSFET、SBD の試作を行い、モジュール試作/評価を実施した。また、高密度化の重要要素である高温実装技術に必要な要素技術の研究を進め、250℃以上の動作に必要な接合技術の開発を行った。以上の研究成果をもとに 50W/cc 以上のパワー密度を実現するのに必要な課題とその見通しを明らかにした。

## 2. 研究開発項目毎の成果

### 2.1 高効率・高密度インバータユニット技術開発（伊丹サイト）

#### （１）高効率・高密度インバータユニット技術開発

H18 年度は素子耐圧安定化を目的に終端構造の最適化検討を行い、1700V 以上の耐圧を有する SiC-MOSFET、SBD を試作実証した。また SiC-MOSFET のオン抵抗低減に向け、素子の基本単位であるセルの微細化検討を有効面積 3mm□MOSFET に対し実施し、典型的なオン抵抗値として約 8mΩ$cm^2$を得た。続いて大容量化検討として素子面積 5mm□の MOSFET 及び SBD を試作し、ハーフブリッジ構成で動特性を評価した結果、100A のスイッチング動作を確認した。

また、パワーデバイスとしての限界特性評価の一環として、MOSFET に対して短絡時の評価を実施し、試作したデバイスの構造パラメータの範囲で破壊までの時間としては現状パワーデバイスにおいて標準的な 10μsec 以上であることを確認した。さらにインバータユニットの検討として、3mm□の SiC-MOSFET とSBD を用いた 3.7kW 級のプロトタイプインバータモジュール(6 素子入り)を試作した。

H19 年度は H18 年に試作した 3mm□の SiC-MOSFET、SBD を用いたプロトタイプインバータモジュール(6 素子入り)を用い、3.7kW インバータユニットを試作した。このインバータユニットを用いてモータの負荷連続試験を実施した結果、3.7kW 出力時に Si-IGBT を用いたインバータユニットに比べて電力損失が 50％に低減できることを確認した。またインバータユニットの小型化の指標であるパワー密度は Si-IGBT インバータ比で約 4 倍に相当する 9W/$cm^3$を達成した。続いてインバータ設計に必要なデバイス回路モデル構築の一貫として、動特性に対応可能な

SiC-MOSFET 回路モデルを構築するとともに、モデルと実測の比較を行い、良好な一致を確認した。さらにSiC-MOSFETのアバランシェ耐量、短絡耐量、SBDのリカバリー耐量等の限界特性を評価し、14kVA(11kW 出力)インバータ動作に十分な耐量を確認した。これらの知見よりモジュールの容量増大を目的に3mm□のSiC-MOSFETを3並列、SBDを2並列にした並列モジュール(30A級)を試作した。このモジュールの3相インバータユニット(14kVA)適用時の損失を推定するために、静特性、動特性の評価を実施した。その結果、Siインバータ比で損失30%(70%減)が達成できる見通しを得た。

H19 年度からは追加研究項目として、インバータの高キャリア周波数化について研究開発に着手し、その一環として昇降圧チョッパを用いた高キャリア駆動の基礎特性評価を行い、20kHz 駆動時の波形評価から安定な動作を確認した。

H20年度はH19年度に試作した並列モジュール(30A級)を用いて、実際にモータ駆動試験を実施し、損失の評価を行った。その結果、予想通り10kW出力時にSi-IGBTを用いたインバータに比べて損失が 70%低減されていることを実験的に確認した。さらにこの結果を元に 14kVA(11kW 出力)インバータユニットを設計、試作した。試作したインバータユニットの体積は 1.1L で、パワー密度は10W/cm$^3$を達成した。続いて、このインバータユニットの損失評価を行い11kW出力時にSi-IGBTインバータユニットの30%であることを確認し、最終目標を達成した。

高キャリア周波数化については、上下アームのスイッチングにおけるデッドタイムを1μsecに短縮することで、インンバータユニットにおいて 30kHz 高キャリア動作を達成した。またこの結果より、高キャリア化によるインバータに対する利点効果を試算したところリアクトルを1/3の値に設定してもリップル電流は同等以下であることが確認できた。

(2)高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術

H19年度より追加研究項目として4インチウェハを用いたSBD試作評価を実施した。H19年度は4インチウェハのデバイス試作、評価に向けてインライン評価技術の基礎検討に着手した。H20年度はSiCの4インチプロセスを新規に構築し、実際に5mm□のSBDの試作に成功した。評価した電気特性は、ウェハ品質評価管理室での表面欠陥の評価データと相関があることを確認した。また、国内エピ/ウェハメーカーの4インチ SiC エピウェハ上に試作された SBD チップの電気特性は海外エピ/ウェハメーカー品に迫る特性を有することを確認した。

| | 伊丹サイト(三菱電機) | ローム | Cree | GE |
|---|---|---|---|---|
| オン抵(mΩcm$^2$) | 7 | 8.6 | 9 | 11 |
| 耐圧(V) | 1200 | 1350 | 1200 | 1000 |
| 電流(A) | 60 | 20 | 60 | 16 |
| チップサイズ | 5.2mm×5.2mm | 2.4mm×4.8mm | 7mm×8mm | 4.5mm×4.5mm |
| 備考 | 2009/2 | ECSCRM 2008 | ECSCRM 2008 | ECSCRM 2008 |

図表.Ⅲ-1. SiC-MOSFETのベンチマーク

| | 伊丹サイト（三菱電機） | ローム/ホンダ | Fraunhofer ISE（独） | ローム/日産 | 東芝 | 電中研/東芝 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| デバイス | SiC-MOSFET<br>SiC-SBD | SiC-MOSFET<br>SiC-SBD | SiC-MOSFET<br>SiC-SBD | Si-IGBT<br>SiC-HJD | Si-IGBT<br>SiC-SBD | Si-ﾄﾗﾝｼﾞｽﾀ<br>SiC-SBD |
| 出力（ﾓｼﾞｭｰﾙ容量） | 11kW<br>(1200V/75A) | -<br>(1200V/230A) | 7kW | - | 3kW<br>(1200V/10A) | 3.3kW<br>(600V/32A) |
| 損失低減(Si比) | 70% | 46% | 46% | 20% | 30-40% | 15% |

＊　損失低減率が公表されている発表

図表.Ⅲ-2. SiC デバイスを適用した電力変換器の報告例（損失低減効果報告例）

２．２ 高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発（つくばサイト）

（１）インバータ大容量化基盤技術の研究

①放射光トポグラフ法による転位欠陥評価技術

4H-SiC デバイスの内部構造を観察する手段として、放射光を用いた低角入射X線トポグラフ法の開発を進めた。観察されているさまざまな転位のコントラストから各種の転位を同定する手法の確立を目指した。今回のプロジェクトで基底面螺旋転位、基底面刃状転位の区別をつけることが可能となった。また基底面転位の6種類のバーガスベクトルの方向も区別をつけることが可能であることが分かった。また、貫通刃状転位の6種類のバーガスベクトルも区別を付けることができることが分かった。観察されている貫通螺旋転位のバーガスベクトルのC軸方向の成分は、現在のウエハでは大部分±[0001]であり、±[0002]などは観察されなかったことが、補助的に用いた電子顕微鏡観察よりわかった。また、本、低角入射X線トポグラフ法で観察される特長的な転位のコントラストの原因についての考察も行いメカニズムを明確にした。さらに、基板上のエピ膜成長時や、pn 接合界面の形成時の典型的な格子欠陥構造の変化などを示し、新たな知見を得た。

②大容量 SBD の開発と耐圧劣化機構

JBS構造とショットキー電極に Ti を用いて 500℃でアニールをすることにより、低Vfと低リーク電流を両立させることができた。また、活性化熱処理工程で終端構造の表面が荒れることにより、耐圧不良が起こる問題は、活性化熱処理時にカーボンキャップを被せて行うことにより解決し、耐圧 1200Vで 5mm□100A級JBS－SBDの試作に成功した。歩留まり低下の原因はエピタキシャル層の欠陥（ダウンフォールや三角欠陥）であることを突き止め、5mm□JBS－SBDでは 20％程度の歩留まりを得た。当初懸念された転位欠陥に起因する耐圧不良は見つ

からず、エピ欠陥の低減とプロセスの管理の徹底により 5mm□100A級JBS－SBDでも高歩留まりが得られると見通しがたった。

③C 面高耐圧 PiN ダイオードのリーク電流解析

パワーMOSFET のスイッチング損失低減には、高ドーズ Al 注入により高濃度の p 領域を形成し、p ボディー用コンタクト抵抗を低減する必要がある。しかし高ドーズ Al 注入により、p-n 接合のリーク電流の増加が危惧され、異なる Al 濃度でイオン注入された高耐圧 PN ダイオードを作製し、逆方向電流電圧特性を評価した。

その結果、注入 Al 濃度 3x1019cm$^{-3}$ 以下では顕著な逆方向特性の劣化は見られなかったが、注入 Al 濃度 2x1020cm−3 では逆方向特性の劣化（高リーク電流および低絶縁耐圧）が見られた。高リーク電流を示す素子での発光点はらせん転位と一致した。問題を起こす欠陥密度は、注入 Al 濃度が 3x1019cm$^{-3}$ 以下では 35cm$^{-2}$ 以下と見積もられるが、注入 Al 濃度 2x1020cm$^{-3}$ では 500cm$^{-2}$ と急増した。断面ひずみ解析によると結晶面のばらつきが大きな領域が p-n 接合に重なっており、これが欠陥密度の急増の原因と思われる。

④放射光を用いた走査X線マイクロビームによる SiC-PiN ダイオード結晶中の貫通螺旋転位の周りの歪みの 3 次元解析

X線マイクロビーム 3D トポグラフィーにより，リーク SD とノンリーク SD の歪み解析を行った。その結果，リーク SD の歪み場は SD 本来の対称形状であるのに対し，ノンリーク SD の歪み場は非対称形状となっていることがわかった。また欠陥密度の指標としてのロッキングカーブピーク幅はノンリーク SD よりリーク SD のほうが大きいことがわかった。以上のことから，ノンリーク SD では転位芯の拡がりによる歪みの緩和で結晶欠陥が少なく，電流リークを生じにくいと考えられる。イオン注入の解析では，イオン注入により形成されたダメージの下に欠陥密度の高い領域(深部欠陥)があって，その領域は深さ 2.9μm の p-n 接合を超えて約 4μm の深さまで達していることがわかった。したがって，イオン注入によるリーク電流の増大はこの深部欠陥が影響していると考えられる。

⑤PiN ダイオード逆方向耐圧不良、金属不純物の効果

PiN ダイオード逆方向耐圧不良に影響を及ぼす金属不純物の効果を調べた。ウエハ中の微量不純物元素を放射光を用いた蛍光X線で調べ Cr、Fe、Co、Ni、Cu などの微量金属不純物の存在を検出した。購入直後の SiC ウエハの表面を全反射蛍光X線で調べ、各種の金属不純物が表面に存在していることを確認した。RCA 洗浄を繰り返すとこれらの表面の汚染はある程度抑えられることを確認した。PiN ダイオード逆方向特性を測定するときに、エミッション顕微鏡で観察し、逆方向に電流が流れるとき発光がターミネーションエッジで観察されるものを正常品と定義し、pn 接合内部で発行が観察されるものを不良品と定義した。不良品の pn ジャンクション発光部を SIMS で分析すると、微量検出限界を少し上回る微量 Fe,Cu,Cr,Ti など

の不純物が検出された。意図的に金属微量不純物 Fe,Cu, Ti, V1017atoms/cm$^3$, 1018atoms/cm$^3$をインプラした後 1800° C で 1.5 分アニールを行い、EBIC, CL で観察した。Fe,Cu では十分拡散し、転位のコントラストなどに変化が見られた。また転位の Cu による固着を示唆していると推察された。

⑥大容量 DIMOS の開発と耐圧劣化機構

大面積 SiC-DMOSFET における耐圧劣化、および耐圧歩留まり低下要因を、作製プロセスと結晶欠陥(転位)の２つの観点から調査し、その支配的要因を明らかとすることを目標として研究を行った。１～3mm□素子を試作すると同時に単純な PiN ダイオード構造から段階的に DMOS 構造に近づく 4 つの PiN 接合 TEG(Test Elementary Group)を用いて因数分解し、SiC-DMOSFET のオフ特性における重要課題を明らかにした。その結果、小さい素子サイズ(150um 角)の V-I 特性評価より、耐圧および耐圧歩留まりという観点からは p-well 構造の有無で耐圧不良が多くなることは無いことがわかった。素子サイズと耐圧歩留まりの関係については、耐圧歩留まりは素子サイズに大きく依存し、アクティブ領域を拡大すると耐圧歩留まりは低下する結果が得られた。ここで、DMOSFET の耐圧歩留まり低下の支配的要因は、JFET領域上の酸化膜破壊であり、破壊箇所と転位位置には強い相関は見られないことから、現状での耐圧歩留まりの低下はプロセス要因が支配的であることを示唆された。特に、活性化熱処理工程が耐圧歩留まりに大きな影響を与えることを明らかにし、高温・短時間の活性化アニール処理が耐圧歩留まり改善に有効であることを確認した。リーク電流と転位密度の関連性についても転位密度の異なるSICウエハを準備してPiNダイオードを試作しリーク電流を比較した。転位密度の異なるウェハ上に作製したPiNダイオードにおいて、リーク電流が比較的大きい値を示す素子の数と転位密度の間には明確な相関関係が見られる結果が得られた。一方で、同一ウェハ内では素子領域に含まれる貫通螺旋転位(TSD)の数とリーク電流値に明確な相関(依存性)は見られなかった。貫通螺旋転位については、懸念すべき欠陥ではあるが、現在市販されているSiCウエハに存在する貫通螺旋転位密度程度であれば、実用上ほぼ問題ないレベルであると思われる。

(2) インバータ信頼性向上基盤技術の研究

5mm□100A のパワーMOSFET を実現するために必要な高チャネル移動度とゲート酸化膜の信頼性寿命を達成するのに必要なゲート酸化膜の製造プロセス及び SiC ウエハの条件を明確にするために、ゲート酸化温度、酸化雰囲気、酸化後アニール(POA)及び SiC ウエハの欠陥がこの２つの特性にどのように影響するかを調べた。製造プロセス条件は、ドライ酸化で 1350℃まで酸化温度を上昇するにつれて絶縁破壊電荷が増加する。次いで、ドライ酸化の後に N2O 雰囲気でのアニール、さらに H2 雰囲気でのアニールを行うことにより、絶縁破壊電荷が増加するので、ドライ酸化+N2O アニール+H2 アニールが最も高い信頼性を有するゲート酸化膜が得られる。この条件でのチャネル移動度は、30.7cm2/Vs となり得られた中では最も

高いので(0001)Si 面では、ドライ酸化の後に N2O と H2 アニールを行うことが、高信頼性と高チャネル移動度を両立させるプロセス条件である。SiC ウエハの欠陥とゲート酸化膜の信頼性寿命の研究からは、ダウンフォールや三角欠陥等のエピタキシャル成長中に発生する欠陥がキラーとなることがわかった。転位のうち刃状転位でのゲート酸化膜破壊の発生はほとんど無い。一方、基底面転位と螺旋転位では、かなりの高い確率でゲート酸化膜の破壊が発生するが致命的ではない。このことを裏付けるために、転位密度が約 9000 個/cm2 と約 2500 個/cm2 の2種類の SiC 基板を用意してキラー欠陥であるダウンフォールと三角欠陥の密度が非常に少ない高品質のエピタキシャル基板を用いて、500μm□、1mm□、3mm□の MOS キャパシタを作製して TZDB,TDDB 測定を行った。TZDB 測定では、絶縁破壊電界の最頻値は転位密度及び面積によらず、11MV/cm であった。また、TDDB 測定を 9 MV/cm,9.5 MV/cm,10MV/cm で行い各電界での寿命を算出して実際の動作電界である 3MV/cm の TDDB 寿命を外挿して求めたところ、転位密度及び面積によらず実際の使用に要求される 30 年を十分に超えている。3 つの大きさの MOS キャパシタの各電界での TDDB 寿命から 5mm□での TDDB 寿命を外挿したところ、3MV/cm での TDDB 寿命は、やはり、30 年を超えることが分かり、転位密度が約 9000 個/cm2 以下の SiC 基板上にダウンフォールと三角欠陥が非常に少ない高品質エピタキシャル層を形成できれば 5mm□のゲート酸化膜においても 30 年の長期信頼性寿命を保証できると考えられる。但し、実際のパワーMOSFET ではトータルの信頼性を保証する必要があり負荷短絡耐量やアバランシェ耐量のような破壊耐量と SiC 基板の転位欠陥との相関を調べる必要がある。

①(0001)Si 面上の高チャネル移動度と高信頼性ゲート酸化膜

5mm□100A のパワーMOSFET を実現するために必要な高チャネル移動度とゲート酸化膜の信頼性寿命を達成するのに必要なゲート酸化膜の製造プロセス及び SiC ウエハの条件を明確にするために、ゲート酸化温度、酸化雰囲気、酸化後アニール(POA)及び SiC ウエハの欠陥がこの2つの特性にどのように影響するかを調べた。製造プロセス条件は、ドライ酸化で 1350℃まで酸化温度を上昇するにつれて絶縁破壊電荷が増加する。次いで、ドライ酸化の後に $N_2O$ 雰囲気でのアニール、さらに H2 雰囲気でのアニールを行うことにより、絶縁破壊電荷が増加するので、ドライ酸化+$N_2O$ アニール+H2 アニールが最も高い信頼性を有するゲート酸化膜が得られる。この条件でのチャネル移動度は、30.7cm$^2$/Vs となり得られた中では最も高いので(0001)Si 面では、ドライ酸化の後に $N_2O$ と $H_2$ アニールを行うことが、高信頼性と高チャネル移動度を両立させるプロセス条件である。SiC ウエハの欠陥とゲート酸化膜の信頼性寿命の研究からは、ダウンフォールや三角欠陥等のエピタキシャル成長中に発生する欠陥がキラーとなることがわかった。転位のうち刃状転位でのゲート酸化膜破壊の発生はほとんど無い。一方、基底面転位と螺旋転位では、かなりの高い確率でゲート酸化膜の破壊が発生するが致命的ではない。このことを裏付けるために、転位密度が約 9000 個/cm$^2$と約 2500 個/cm$^2$の2種類の SiC 基板を用意してキラー欠陥であるダウンフォールと三角欠陥の密度が非常に少な

い高品質のエピタキシャル基板を用いて、500μm□、1mm□、3mm□の MOS キャパシタを作製して TZDB,TDDB 測定を行った。TZDB 測定では、絶縁破壊電界の最頻値は転位密度及び面積によらず、11MV/cm であった。また、TDDB 測定を 9 MV/cm,9.5 MV/cm,10MV/cm で行い各電界での寿命を算出して実際の動作電界である 3MV/cm の TDDB 寿命を外挿して求めたところ、転位密度及び面積によらず実際の使用に要求される 30 年を十分に超えている。3 つの大きさの MOS キャパシタの各電界での TDDB 寿命から 5mm□での TDDB 寿命を外挿したところ、3MV/cm での TDDB 寿命は、やはり、30 年を超えることが分かり、転位密度が約 9000 個/cm$^2$ 以下の SiC 基板上にダウンフォールと三角欠陥が非常に少ない高品質エピタキシャル層を形成できれば 5mm□のゲート酸化膜においても 30 年の長期信頼性寿命を保証できると考えられる。但し、実際のパワーMOSFET ではトータルの信頼性を保証する必要があり負荷短絡耐量やアバランシェ耐量のような破壊耐量と SiC 基板の転位欠陥との相関を調べる必要がある。

②(000-1)C 面上の高チャネル移動度と高信頼性ゲート酸化膜

結晶欠陥密度が大きいウェハ、小さいウェハ及びエピ表面欠陥密度が大きいウェハ及び、小さいウェハを用意し、酸化膜信頼性特性の優劣を調べた。その結果、結晶欠陥密度より、エピ表面欠陥密度が大きいウェハにおいて顕著な信頼性の劣化が見られた。ウェット酸化膜においては、ウェット酸化直後の水素アニールによって信頼性が向上することが判明し、さらに 800℃が最適であることを確かめた。N2O による酸化プロセスにおいては N2O の直接酸化より、ドライ酸化＋N2O アニールによる酸化膜が高信頼性を示した。ドライ酸化＋N2O アニールによるゲート酸化による大面積酸化膜の寿命について調べた。加速電界における不良率 65％の寿命からゲート電界 3MV/cm における寿命を外挿した。3mm 角以下のゲート酸化膜では真性破壊モードによる破壊が主であり、30 年以上の寿命が推定された。一方、5mm角のゲート酸化膜においては表面欠陥起因の初期破壊が 50％に及んだ。残りの素子もほとんど偶発不良モードで破壊した。しかしながら、5mm 角においても酸化膜寿命は30年以上であることが確認できた。

以上まとめると、5mm 角以上の大面積のゲート酸化膜の寿命は主にゲート酸化プロセスと表面欠陥密度によって支配されており、高信頼化にはゲート酸化プロセスのさらなる最適化と、表面欠陥密度、特に“ダウンフォール”、“三角欠陥”の低減が必須である。なお C 面においては1例を除いて螺旋転位や刃状転位などの結晶欠陥との強い相関は観察されなかった。

(3)インバータ高パワー密度化基盤技術

基本計画に基づき本研究グループは、「高パワー密度化に必要な条件を明らかにし、その見通しを明らかにする」事を目標に研究を進めてきた。インバータ損失統合設計シミュレータによるインバータ出力パワー密度予測を行い、50W/cc以上の高パワー密度化への条件を定量的に検討できる手法を開発した。高パワー密度インバータの実証を行うために必要な高性能デバイスと

して所定の性能を有するSBD，MOSFETの試作を行い、モジュール試作/評価を実施した。加えて、高密度化の重要要素である高温実装技術に必要な要素技術の研究を進め、250℃以上の動作に必要な接合技術の開発を行った。以上の研究成果をベースに50W/cc以上のパワー密度を実現するのに必要な課題とその見通しを明らかにした。

## ３．成果の水準と目標の達成度

評価　◎：目標値を大きく達成したか前倒しで達成、○：計画通り目標達成、△：目標一部未達成か達成時期遅れ、×：目標未達成

(次頁より)
図表Ⅲ−３．成果の水準と目標の達成度

| 開発項目（サブテーマ） | 20年度実施計画の目標 | 主な成果およびその水準 | 基本計画 | 基本計画に規定された目標の達成状況 | 自己評価 |
|---|---|---|---|---|---|
| Ⅰ．高効率・高密度インバータユニット技術開発 | ①AC400V系、出力容量14kVAのSiC3相インバータユニットの設計、試作 | 5mm□SiC-MOSFETとSiC-SBDを適用した6in1モジュールを用いて、14kVA（11kW出力）/400Vインバータユニット（体積1.1L）を設計、試作した。パワー密度10W/cm3 を達成。 | 具体的内容：ダイオード・MOS型スイッチング素子作製プロセス技術、素子耐圧安定化技術、素子オン抵抗低減化技術、インバータ化技術等の技術開発を実施する。 | 14kVA（11kW出力）インバータユニット（体積1.1L）を試作し、最終成果目標を達成した。 | ○ |
| | ②SiCインバータユニットの損失が同定格のSiインバータユニットの70％減を実証 | 14kVA（11kW）インバータユニットを用いて400V系、11kWの3相誘導モータの連続駆動試験を実施。<br>電力損失が、11kW出力時にSi-IGBTデバイスを用いたSiインバータの30％であることを確認した。 | 達成目標：出力電圧（AC 400 Vrms、60 Hz）、出力電流（AC 20 Arms）、出力容量（14 kVA）の3相インバータユニットを試作し、その損失が同定格のSiインバータの30％以下であることを実証する。 | Siインバータ比で電力損失を30％に低減できることを実証し、最終成果目標を達成した。 | ○ |
| | ③高キャリア周波数化効果検証 | 上下アームのスイッチングにおけるデッドタイムを1μsecに短縮することで、30kHz高キャリア動作を達成した。またこの結果より、高キャリア化による利点効果を試算し、リアクトルを1/3の値に設定してもリップル電流は同等以下にできることが確認できた。 | インバータの高キャリア周波数化（＞15kHz)に関し評価検討を行い高キャリア周波数化効果を明確にする。 | 14kVA（11kW）SiCインバータユニットを用いて、キャリア周波数30kHz動作を確認し、最終成果目標を達成した。 | ○ |
| Ⅱ．高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤開発 | ①SiCウェハの転位解析法の確立と想定される素子の電気特性劣化モデルの検証 | (1) 貫通螺旋転位のバーガスベクトルと貫通螺旋転位のコントラストとの間の関係を明確にした。このような転位の詳細解析は、世界初。また積層欠陥による電子準位などを明確にした。 | SiCウェハの品質とその上に試作したスイッチング素子特性の関連を明確化する。インバータの大容量化に不可欠なスイッチング素子の大容量化に関しては、5 mm角級チップを試作し、電流容量100 Aの性能を達成する条件を明確にする。 | H19年度に開発した活性化熱処理プロセスを用いて、プロセス起因欠陥の分離が進んだ。SBDでは5mm□試作／評価により不良原因が明確になった。MOSFETでも5mm□までの試作／評価が進み、最終目標である5mm□素子、100Aを達成するのに必要な条件を明確化できた。 | ○ |
| (1)インバータ大容量化基盤技術 | | (2)　Alインプラにより形成された格子欠陥と貫通螺旋転位部の発光の関係から、Alのイオンインプラ量を抑えることが、PINダイオードの耐圧不良を回避する一つの方策であることが新たにわかった。 | | | |
| | | (3)　PINダイオードの耐圧不良を起こすものとして、PINダイオードでは局所的に微量のFe、Crなどの金属不純物元素が存在することが新たに確認された | | | |
| | | (4) Cu原子などが転位の回りに寄って来ていることの傍証的結果を新たに観察した。 | | | |

| 開発項目（サブテーマ） | 20年度実施計画の目標 | 主な成果およびその水準 | 基本計画 | 基本計画に規定された目標の達成状況 | 自己評価 |
|---|---|---|---|---|---|
| Ⅱ．高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤開発<br><br>(1)インバータ大容量化基盤技術 | ②5mm□のDMOSやその要素構造、SBD等を試作すると共に、それらの素子特性と各種評価法によるウェハ欠陥との相関付けを行い、特性劣化欠陥、100A/チップ性能達成条件を明確化する。 | (1) JBS−SBDの耐圧不良には、転位欠陥よりもダウンホールのようなエピ欠陥やプロセス欠陥が大きく影響していることが確認されたが、逆方向特性のリーク電流は、良品であっても、螺旋転位に集中的に流れていると推定される。ダウンフォールがダイオード耐圧不良の主要キラー欠陥である。<br>　5mm□素子作製においては、現在市販されている1万個/cm2程度のウエハーであれば、ダウンフォール、三角欠陥等のエピタキシャル層の欠陥を無くすと同時に活性化熱処理等のプロセスを工夫すれば5mm□、100A級SiC－SBDが試作 | SiCウェハの品質とその上に試作したスイッチング素子特性の関連を明確化する。インバータの大容量化に不可欠なスイッチング素子の大容量化に関しては、5 mm角級チップを試作し、電流容量100 Aの性能を達成する条件を明確にする。 | 転位の精密同定が大きく進展し、キラー欠陥密度を念頭に、プロセス要因の影響も含めて目標とする特性阻害要因の解明と特性実現条件を明確化できた。 | ○ |
| | ③熱アニール時の表面荒れを抑制し、歩留まりを向上する技術の開発 | (2) DIMOSでは、その要素構造での解析から、転位が直接耐圧不良を引き起こしている可能性は低いこと、基板の転位密度減少と共に高リーク電流素子の割合が減少すること、等が判明した。DMOSの耐圧不良がSiC半導体内部ではなく、酸化膜で発生する可能性が高いということが、本成果で初めて明らかになった。この時に短時間で活性化熱処理を行うとSiC表面の荒れが小さくなり、酸化膜での破壊が抑制されることを明らかにした。<br>・SiCデバイスプロセスのボトルネックであった活性化熱処理に関し、カーボン保護膜で表面荒れを抑制で | | | ○ |
| | ④ 4インチプロセス構築及びSBD試作評価 | (1)国産4インチエピ、ウェハを用いて試作したSBDの特性を評価し、海外製ウェハを用いて作製したSBDに迫る特性が得られることを確認した。 | | | ○ |
| | | (2) 4インチウェハプロセス構築に向けて、ウェハ、プロセス設備、部品類の手配、及びプロセス検討を行った。現在、4インチウェハを用いたSBD試作プロセスを実施中。SiC4インチウェハプロセスを構築し、4インチウェハを用いて5mm□のSBDの試作に成功した。<br><br>＜SiCウェハ品質評価はウェハ品質評価管理室担当、SBD試作・評価は伊丹サイト担当＞ | | | |

| 開発項目（サブテーマ） | 20年度実施計画の目標 | 主な成果およびその水準 | 基本計画 | 基本計画に規定された目標の達成状況 | 自己評価 |
|---|---|---|---|---|---|
| (2)インバータ信頼性向上基盤技術 | ①5mm□までのゲート酸化膜キャパシタ及びMOSFETを試作する。また、信頼性とチャネル移動度が両立する酸化膜形成条件を明確化する。 | (1)　Si面：ドライ酸化（1350℃）+N2O処理（1350℃）+H2（1000℃）プロセスによるゲート酸化膜の形成により高チャネル移動度（30cm2/Vs）を達成した。また、1250℃以上の高温で信頼性寿命が長くなることは、本成果で初めて明らかとなった重要な知見である。<br><br>(2)　C面：ドライ酸化（1250℃）+N2O酸化（1250℃）+H2（1000℃）プロセスにより高移動度（40cm2/Vs）を達成した。この値は、C面におけるN2Oを用いたゲート酸化膜形成法で は世界最高値である。<br>ゲ | SiCスイッチング素子の信頼性評価手法を開発し長期信頼性を決めている要因を明確化する。特に最大の課題であるMOSスイッチング素子の酸化膜について、5mm角級チップを試作し、実用素子に求められる信頼性を達成する条件を明確にする。 | 高チャネル移動度を実現できるゲート酸化法を用いて作製される、転位密度1,000個/cm2と10,000個/cm2の基板上の3mm□及び5mm□酸化膜素子の信頼性を評価することにより、実用的5mm□酸化膜素子の寿命30年に必要な転位密度が明確になった。<br>また、KOHエッチングによる転位密度評価から酸化膜素子のキラー欠陥を同定することにより、最終目標を達成できた。 | ○ |
| | ②上記ゲート酸化膜キャパシタの結晶欠陥を同定して、TZDB特性,TDDB寿命と対応づけ、100A級SiC DMOSの実用化に必要なゲート酸化膜信頼性寿命（30年）を得るために必要な条件を明確にする。 | （1）　MOS構造において欠陥破壊と素子構造破壊を分離することを可能とし，素子信頼性予測についての指針を明確にした。<br><br>（2）ゲート絶縁破壊箇所と転位欠陥との相関を評価した結果，基底面転位と螺旋転位で絶縁破壊が生じるが，刃状転位ではほとんど絶縁破壊が生じておらず、上記2種類の転位はデバイスキラー欠陥ではないと考えられる.<br>エピタキシャル層中のダウンフォール欠陥がゲート酸化膜のキラー欠陥となることが判明した。<br>　更に、エピタキシャル層の種々の表面欠陥がキラー欠陥であることが判った。また，過度の犠牲酸化は | | | ○ |

| 開発項目<br>（サブテーマ） | 20年度実施計画の目標 | 主な成果およびその水準 | 基本計画 | 基本計画に規定された目標の達成状況 | 自己評価 |
|---|---|---|---|---|---|
| （インバータ信頼性向上基盤技術） | | (3) Si面：転位欠陥1000個/cm2級、10000個/cm2級のSiC基板に対して、ゲート酸化膜の耐圧分布とTDDB寿命＠ 3MV/cmの加速試験を行った。<br>この時にエピタキシャル層のキラー欠陥が非常に少ない基板では3MV/cmで30年を十分に超えることが判明した。<br>5mm□での寿命も外挿法により算出したところ30年を超える。<br>C面：エピタキシャル層のダウンフォールと三角欠陥はキラー欠陥である。ドライ酸化+N2O酸化でゲート酸化膜を形成した試料で真性破壊領域での絶縁破壊電荷量の面積依存性がなく | | | |
| | | 結論として、5mm□級100AのDMOSの実用化に必要なゲート酸化膜の信頼性寿命を得るには、以下の3点が重要であることが判明した。1）SiC基板の転移密度は市販されている10000個/cm2級以下であること、2）エピタキシャル層のダウンフォールや三角欠陥等を無くすなどの品質を向上させる。3）特にSi面の場合にはエピタキシャル層にピットを出さないプロセスの構築を行う。上記のようなアプローチは、世界的に見て他に類の無い、本プロジェクトだけの研究方法である。 | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

| 開発項目（サブテーマ） | 20年度実施計画の目標 | 主な成果およびその水準 | 基本計画 | 基本計画に規定された目標の達成状況 | 自己評価 |
|---|---|---|---|---|---|
| (3)インバータ高パワー密度化基盤技術 | ①高密度インバータ用低オン抵抗デバイスの大容量化、高性能化を試みると共に、それらを用いたインバータの各種動作評価を行う。（600V-1200V, 10A以上，0,1Ω級のIEMOS、600V,1200V, 10A, オン電圧,1.2VのSBD、10A級GaN-HFETによるインバータ回路試作/評価） | （1）IEMOSについては、加速資金で導入したカーボンキャップ装置による耐圧歩留まり向上を確認し、インバータ回路での評価に使用する10A級IEMOSを製作した。<br>オン電圧と逆漏れ電流の低い1200V耐圧SBDの試作を行い、世界トップクラスの特性(オン電圧1.2V@200A/cm2)を達成した。<br><br>(2) SiCデバイスとの相互評価のためのGaN HFETについては、10A級GaN素子(0.12Ω)の試作し、インバータ損失統合設計シミュレータであるSi, SiCとの比較・評価を行った。<br><br>その結果、1200V 耐圧の産業応用及び自動車応用はSiC が軸となって実用化が進み、600V 耐圧以下の民生用のアプリケーションでは、高速スイッチングのメリットを生かしたGaN デバイスの応用開発が進むとする方向性が見えた。 | 素子あたり10 A以上のSiC低損失MOSスイッチング素子（オン抵抗2～5mΩ・cm2, 耐圧 0.6～1.7kV）の開発を行う。インバータ損失の限界を追及する限界設計技術を開発し、高パワー密度(50W/cm3以上)のSiCインバータを実現に必要な条件を明らかにし、その見通しを明確化する。同様に、高速制御技術および高温（250℃）環境での動作の実装技術の指針を提示する。 | インバータ損失統合設計シミュレータによるインバータ出力パワー密度予測を行い、最終目標である50W/ccの高パワー密度化への指針を総合的に提示できた。<br>高密度化の重要要素である高温動作時のモジュール特性評価については、デバイスおよび実装レベルでの信頼性評価の見通しを提示した。 | ○ |
| | ②インバータ高機能化技術<br>高機能インバータに必要な高速連携制御技術、EMI対応技術など個別技術の指針を提示する。 | （1）高速制御技術については、インバータシステム間の連携制御における複数台電力変換器応用システムに関する性能評価を実施し、高速制御のメリットを生かした連系制御の方向性を示した。（千葉大と共同実施）<br>(2) 超高速スイッチングに起因するEMI問題について、新たに内部ノイズ電流に着目し、実測に基づく評価からその重要性を指摘するとともに、対策を検討して指標を示した。（首都大学東京との共同実施） | | | ○ |

| 開発項目（サブテーマ） | 20年度実施計画の目標 | 主な成果およびその水準 | 基本計画 | 基本計画に規定された目標の達成状況 | 自己評価 |
|---|---|---|---|---|---|
| (3)インバータ高パワー密度化基盤技術 | ①高密度インバータ用低オン抵抗デバイスの大容量化、高性能化を試みると共に、それらを用いたインバータの各種動作評価を行う。（600V-1200V, 10A以上, 0,1Ω級のIEMOS、600V,1200V, 10A, オン電圧,1.2VのSBD、10A級GaN-HFETによるインバータ回路試作/評価） | （1）IEMOSについては、加速資金で導入したカーボンキャップ装置による耐圧歩留まり向上を確認し、インバータ回路での評価に使用する10A級IEMOSを製作した。<br>オン電圧と逆漏れ電流の低い1200V耐圧SBDの試作を行い、世界トップクラスの特性(オン電圧1.2V@200A/cm2)を達成した。<br><br>(2) SiCデバイスとの相互評価のためのGaN HFETについては、10A級GaN素子(0.12Ω)の試作し、インバータ損失統合設計シミュレータであるSi, SiCとの比較・評価を行った。<br><br>その結果、1200V 耐圧の産業応用及び自動車応用はSiC が軸となって実用化が進み、600V 耐圧以下の民生用のアプリケーションでは、高速スイッチングのメリットを生かしたGaN デバイスの応用開発が進むとする方向性が見えた。 | 素子あたり10 A以上のSiC低損失MOSスイッチング素子（オン抵抗2～5mΩ・cm2, 耐圧 0.6～1.7kV）の開発を行う。インバータ損失の限界を追及する限界設計技術を開発し、高パワー密度(50W/cm3以上)のSiCインバータを実現に必要な条件を明らかにし、その見通しを明確化する。同様に、高速制御技術および高温(250℃)環境での動作の実装技術の指針を提示する。 | インバータ損失統合設計シミュレータによるインバータ出力パワー密度予測を行い、最終目標である50W/ccの高パワー密度化への指針を総合的に提示できた。<br>高密度化の重要要素である高温動作時のモジュール特性評価については、デバイスおよび実装レベルでの信頼性評価の見通しを提示した。 | ○ |
| | ②インバータ高機能化技術<br>高機能インバータに必要な高速連携制御技術、EMI対応技術など個別技術の指針を提示する。 | （1）高速制御技術については、インバータシステム間の連携制御における複数台電力変換器応用システムに関する性能評価を実施し、高速制御のメリットを生かした連系制御の方向性を示した。（千葉大と共同実施）<br>(2) 超高速スイッチングに起因するEMI問題について、新たに内部ノイズ電流に着目し、実測に基づく評価からその重要性を指摘するとともに、対策を検討して指標を示した。（首都大学東京との共同実施） | | | ○ |

| 開発項目（サブテーマ） | 20年度実施計画の目標 | 主な成果およびその水準 | 基本計画 | 基本計画に規定された目標の達成状況 | 自己評価 |
|---|---|---|---|---|---|
| (インバータ高パワー密度化基盤技術) | ③高温実装技術<br>・チップの耐熱性強化、デバイス／電極接合の200℃耐熱化、及び長時間特性の確認を行う。<br>・ダイアタッチ用の銀ナノ粒子・ナノロッドの合成条件の追求と特性評価を行う。 | (1)　SiC-MOSFETのAlメタライゼーションプロセスおよびAl電極へ直接半田付けする電極形成技術に関し、信頼性評価を進めた結果、上記の電極形成も含めてデバイス特性、ダイボンディング特性などについて高温放置試験（最大300℃）を行い、当初目標をクリアしていることを確認した。300℃は、Siデバイスでは想定されていない高温域であり、高温実装関連技術として極めて重要な領域である。<br><br>(2)　サブミクロン銀粒子の混合方法、熱処理温度の検討を行い、接合強度の最適化条件を探った結果、改良のめどを得た | | | ◎ |
| | ④高パワー密度変換器設計<br>デバイス技術、高温実装技術、高機能化技術を総合的に統合した上で、インバータ限界設計技術を適用し、高パワー密度(50W/cm3以上)SiCインバータを実現するのに必要な条件を明確化する。 | (1)　インバータ損失統合設計シミュレータについて、計算速度向上、パラメータ入力法改善、3次元グラフィックス出力化に加えて、複数のプログラムをリンクさせるシミュレータ(iSIGHT)を導入し、パワー密度に影響する複雑かつ多数の設計パラメータの感度解析の実行を可能にした。本アプローチは他に例を見ない革新的な取り組みであり、高パワー密度(50W/cm3)のSiCインバータ実現に必要な条件を明らかにするために必要な環境として、活用を図った | | | ◎ |
| | | (2)　上記シミュレータと低オン抵抗デバイス試作結果、デバイス特性評価結果、高温実装技術研究結果、インバータ高機能化技術の成果を総合的に活用し、50W/cm3の見通しを明確にした。 | | | |
| | | | | | |

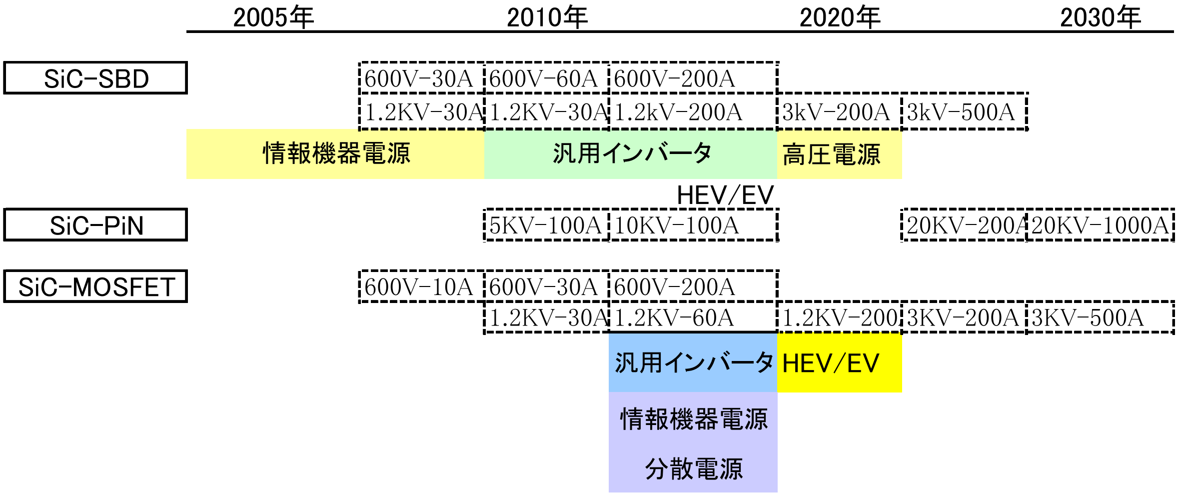
| 開発項目（サブテーマ） | 20年度実施計画の目標 | 主な成果およびその水準 | 基本計画 | 基本計画に規定された目標の達成状況 | 自己評価 |
|---|---|---|---|---|---|
| (インバータ高パワー密度化基盤技術) | ⑤プロセス起因欠陥解析とインバータ設計最適化技術（電中研へ再委託して実施） | （1）PN接合形成の際のイオン注入による基底面転位移動現象を見出し、そのイオン注入パターン依存性を詳細に解析した。<br>本アプローチは、デバイス内の無効領域へ欠陥を誘導する手法を目指すものであり、転位挙動を積極的に利用するという意味で他に例を見ない成果を得た。<br><br>（2）インバータシミュレーションツールを用いて、損失およびスイッチング過電圧を解析し，実験結果との整合性を検証した。<br>システム設計と高パワー密度化との協調方法を整理して、統合的なインバータ設計最適化技術の構造を明確にするべく検討を進め | | | ○ |
| | ⑥システム応用基盤技術（東工大と共同実施） | 自然エネルギーの短周期変動の抑制を目的とした<br>トランスレス・カスケードPWM変換器を用いたエネルギー<br>貯蔵シ ステムを設計・試作し、性能を評価した。<br>双方向絶縁形DC/DC コンバータの基盤設計・製作し、<br>性能評価を実施し、コンバータセルについて検討し、所<br>期の目標を達成した。 | | | ○ |
| | | | | | |
| | | | | | |

4. 研究発表・講演・特許・その他の公表

図表Ⅲ-4. 成果の水準と目標の達成度

| | H18 | H19 | H20 | 計 |
|---|---|---|---|---|
| 特許出願 | 0 | 5 | 9 | 14件 |
| 論文（査読付き） | 2（1） | 10（10） | 27（27） | 39件 |
| 研究発表・講演 | 4 | 29 | 48 | 81件 |
| 受賞実績 | 0 | 0 | 2 | 2件 |
| 新聞・雑誌等への掲載 | 1 | 2 | 1 | 4件 |
| 展示会への出展 | 0 | 1 | 2 | 3件 |

## Ⅳ．実用化、事業化の見通しについて




図表Ⅳ-1．成果の水準と目標の達成度

### 1．成果の実用化可能性

SiC を適用したインバータユニットの性能実証というプロジェクト成果をもとに、量産化に向けた素子、モジュール製造ラインの整備、低コスト化、歩留まり向上を主とした開発が今後すすめられる。ボトルネックとなっていた SiC ウェハの最近の進捗は著しく、高品質化、大口径化として 4 インチ径ウェハはデバイス製品向けに実用化レベルに迫ってきている。わが国でもエピ膜形成装置の開発も進められており、これまでになく実用化が加速すると考えられる。実用化時の製品としてはパワーモジュール単体とそれらを組み込んだパワエレ製品を想定する。量産開始後は耐圧、容量のラインナップ化を進める。市場としては先ず、先ず各企業が Si を用いたパワーモジュール、パワエレ機器でシェアを占めている分野、またパワーモジュール、汎用インバータ等のパワエレ機器において小型、高性能版として市場投入を行うことを想定される。

また基盤技術として、本プロジェクトで確立された高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術を基に実用化研究として高効率・高密度インバータに供する SiC スイッチング素子およびダイオードの開発を継続して行い、次世代インバータの省エネ、超小型化を推し進める。またウェハ及びエピ技術の進展加速の相乗効果により、SiC 素子量産事業化への投資リスクが大幅に低減され、2010 年台初頭には SiC 素子が量産製品化できると見込まれる。

平成22年4月以降、サンプルを限定顧客に配布開始、平成23年4月から本格量産に移行することも可能と考えられる。平成25年に電源、汎用向けパワーモジュール、平成26年にインバータシステムの量産に展開することも可能である。

1.1 適用可能性の明確化

今回のプロジェクトの研究開発とインバータとしての性能実証により、半導体ユニットの大幅な損失の低減と小型化、および基礎となるウェハの品質に実用化するメリットが見出された。今後は、本プロジェクトで得られた知見を利用し、各企業がそれぞれの製品戦略において SiC デバイス／インバータをどこに適用し差別化するか、新製品の開発を行うかによって力点は異なるが、基盤技術として更に開発を進め、実用化をバックアップする必要がある。

1.2 実用化へ向けた課題の明確化と解決手段

本プロジェクトに1素子 10～100Aの大容量化することに成功した。しかしながらSiCパワーMOSFET

の本格的な普及のためには特性向上と低コスト化のためさらなる低オン抵抗化、それに伴うデバイス構造の改良とデバイス製造要素技術の研究開発、ウェハ及びエピ膜の品質向上と大口径化が必要である。

SiC ウェハ及びエピ膜作製に関しては、2～4 インチの国産のバルクウェハも品質においては現在米国の Cree 社に迫るレベルをほぼ確保するに至っているが、実用化の環境で使うためには、デバイス信頼性等を損なうウェハ／エピ膜の品質欠陥の役割を高度に解析し、 キラー欠陥のさらなる低減を図る必要がある。この様なウエハとデバイスの連携プレーは欧米でも充分な体制を取って居らず、本プロジェクトのようなウェハ／エピ膜の評価と各種欠陥のデバイス特性に与える相関関係に関する知見を得て、メーカに情報提供し議論をしていくことが、SiCデバイス向けの高品質エピウェハ供給に重要と考える。これは SiC デバイスの歩留り、すなわちコストに直接的な影響をもたらす。

このような本プロジェクトの活動は、我が国のウェハ産業競争力向上に貢献する。

また、本プロジェクトで明らかになった高温でのデバイス製造プロセスでもたらされるプロセス誘起欠陥の対策も必要である。

デバイスの実用化に関する技術開発に加えて、本来 SiC デバイスが Si デバイスより優れている高温領域ににおける動作を充分活用して機器、システムとしてのメリットを活かすためには、パワーデバイスの高温実装技術のみでなく周辺部品を含めた高温実装への対応が必要である。部品の耐高温性や高温環境下における性能を考慮した設計（電気・熱・機械の要素設計や部品・基板・配線材料等の選択）技術が必要である。しかし、温度領域200～250℃においては、現有の実装技術における知見だけでは対応が不十分な領域であり、部品や実装材料の高温特性把握といった基礎的なレベルの知見を拡充しながら、設計技術に反映してゆく必要がある。

2. 波及効果

2.1 技術的・社会経済的波及効果

パワーエレクトロニクスの市場規模は約 6 兆円で、産業、家電、分散電源、自動車、電鉄、IT 機器等広い分野に適用されている。これらの市場では、パワーエレクトロニクスの特長である低損失

化、小型化、高速化、高温環境対応への期待が大きい。その市場規模は増加すると予想され、2050 年には本研究開発成果が貢献できる耐圧が数百 V 以上のデバイス市場で約 10 兆円と、現在の約 10 倍に増加するとの推定がなされている。1973 年から 2006 年までで、GDP は 2.3 倍となった。その間エネルギーの産業:民生:運輸のエネルギー消費量の比率は4:1:1から2:1:1に変化した。 依然として産業分野の比率は大きいが、家庭、商店、事務所ビル、などの民生部門や自動車、鉄道、船舶、航空などの運輸部門の省エネルギーの重要性は増してきている。

今後は CO2 削減対策が家電、IT 関係、HEV/EV 等の電気製品にも必須の製品戦略の一つとなる。本プロジェクトで開発される SiC デバイスやそれを用いた電力変換器は、電力変換損失低減のキラーデバイスとなる性能を有し、グリーンパワエレ技術、グリーン IT のハードウェア革新として、従来の Si デバイス/機器の性能、とりわけ低損失化、高温動作、冷却装置の小型化に関して変革をもたらすと期待される。SiC デバイス/電力変換器を適用することにより、製品価値の向上が実現される。SiC デバイスが広く普及した際の省エネルギー効果は、2030 年には原油換算で約 5,400 万 kl、と予測されており(2007 年度 NEDO 調査「次世代省エネデバイス」における(財)新機能素子研究開発協調査による)、大きな省エネルギー効果が期待される。

2.2 研究開発の促進、人材育成の促進

本プロジェクトによる SiC デバイスとりわけスイッチング素子の大容量化の成功により、いよいよ損失低減効果の大きなオール SiC の実用化が近くなったが、従来の Si デバイスとの比較、代替メリットを考えるとさらなる基盤技術の研究開発は今後の実用化促進に不可欠である。上記に述べたように、ウェハ、エピ膜という材料からデバイス構造、デバイス製造プロセス、実装技術、とりわけ高温実装技術の研究開発は国際競争力を養う上でさらなる注力が必要である。

SiC の実用化が見えてくると共にこの分野に携わる研究者、技術者が急速に増えてくると思われる。

Si 関係など他の材料・デバイス技術者の転向が最も考えられる。Si と SiC との物性の差が大きくプロセス技術もより高温が必要であったり、硬い材質であることの難しはあるが、基本的には Si デバイス技術者が SiC デバイス技術への対応が可能であると考えられる。

本 SiC デバイスおよび応用製品の開発には、材料から製造プロセス、システムまでの技術を一貫して連携できる人材が必要であり、現行の Si デバイスに対してインセンティブの持てる研究開発システムも必要と考えられる。

## Ｖ．事前評価書とパブリックコメント募集の結果

## １．事前評価書

| 作成日 | 平成17年12月16日 |
|---|---|

| | |
|---|---|
| １．事業名称 | パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発 |
| ２．推進部署名 | 電子・情報技術開発部 |
| ３．事業概要 | （１）概要<br>情報家電の普及や通信需要の拡大に伴い、情報通信分野における電力消費の増大が懸念されている。また、これら機器は、瞬間の停電でも機器動作の異常に繋がることから、無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power Supply）などの需要も拡大しており、このような電力を扱うパワーエレクトロニクス半導体分野における省エネルギー技術の開発が喫緊の課題となっている。<br>さらに、直交変換を行うインバータは、最近急速に普及が進みつつある燃料電池や太陽電池などの直流電源と商用電源の連携や、ハイブリッド自動車などのモーター制御においても不可欠の技術となっている。このため、シリコンよりも材料特性に優れたワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス機器システムを開発し、省エネルギーに資する。<br>（２）事業規模<br>平成18年度事業費 12.6億円<br>（３）事業期間<br>平成18年度～20年度（３年間） |

４．評価の検討状況

（１）事業の位置づけ・必要性

大規模サーバー等の情報処理機器の無停電電源装置や、エアコン等の家電製品においても高効率インバータの導入による省エネルギー対策が不可欠となっている。

また、ハイブリッド／燃料電池自動車の開発・普及により、車載用のパワーデバイスの一層の省エネルギー化が必要とされている。これらの課題を解決するためには、シリコン半導体の限界を超える高効率化、高性能化をもたらす新たな半導体材料（SiC:炭化珪素）を用いたパワーデバイスの実現が極めて重要である。本事業は、情報通信分野の技術戦略マップの半導体分野のディスクリートデバイスに関するパワーデバイスの領域に対応するものである。

（２）研究開発目標の妥当性

現在主流であるシリコンによるパワーデバイスでは、耐圧(電圧)、オン抵抗、許容温度、

動作速度などが理論限界に到達しつつある。このため、低電力損失、高耐圧（電圧）・高温動作可能という優れた特性を有するSiC等の新たなワイドギャップ半導体を用いたパワーデバイスを開発し、それを用いた省エネルギー電力機器の開発が、更なる省エネルギー化に向けて必須の課題となっている。

本事業は、ワイドギャップ半導体デバイスを用いた高効率インバータ等の実用パワーエレクトロニクス技術開発を目指すものであり、妥当な目標設定と考える。目標設定については、今後も有識者ヒアリングなどで意見を聴取し、妥当性についてさらなる検討を行う。

（３）研究開発マネジメント

公募を行い、最適な実施体制を構築する。本研究開発の目的及び目標を踏まえ、機動的な予算配分や事業計画の策定・見直しを行い、適切な運営管理に努める。また、必要に応じて、外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

（４）研究開発成果

本事業の成果により、シリコンパワーデバイスの限界を超える新たな半導体（SiC:炭化珪素）パワーデバイスを用いた、高効率・高性能パワーエレクトロニクス技術が実現し、情報家電の普及や通信需要の拡大に伴い需要が増加する無停電電源装置（UPS）、燃料電池や太陽電池などの直流電源の系統接続、ハイブリッド自動車などのモーター制御等において、大幅な省エネルギー効果が期待される。

（５）実用化・事業化の見通し

従来のシリコン系インバータの性能を大きく凌駕する高効率・高性能インバータの実現により、自動車の省エネ化、ハイブリッド／燃料電池自動車の開発・普及の促進、情報処理通信機器の持続的高性能化と高効率化などが図られ、それらの製品に関する世界市場における優位性が確保されるものと期待できる。

（６）その他特記事項

５．総合評価

シリコンの理論限界を超えた、新たな半導体材料を用いた新型インバータ装置の開発が強く求められており、国際的にも米国、欧州の半導体メーカーが研究開発に凌ぎを削っている。SiC等の新たな材料によるワイドギャップ半導体デバイスの実現に向けては、様々な解決すべき基礎的な課題が存在し、民間企業単独で開発することは困難であるため、NEDOが実施する事業として、産学官の共同研究体制を構築しながら適切に進めることが重要である。

## ２．パブリックコメント募集の結果

# 「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

平成１８年３月１５日
ＮＥＤＯ技術開発機構
電子・情報技術開発部

ＮＥＤＯ ＰＯＳＴ ３において標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。
お寄せいただきましたご意見を検討し、別添の基本計画に反映させていただきました。
みなさまからのご協力を頂き、ありがとうございました。

１．パブリックコメント募集期間
　平成１８年２月９日～平成１８年２月１６日
２．パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞
　計３件
３．パブリックコメントの内容とそれに対する考え方

| ご意見の概要 | ご意見に対する考え方 | 基本計画への反映 |
|---|---|---|
| 全体について | | |
| ［意見１］今回の開発の成果がいかに実用化に資することになるのか、より明確に表現すべきではないかと考える。<br>またこの分野の開発は上記のように早く基盤研究段階を脱し、実用化段階に移行する必要があると考えられ、例えば，トップランナー方式に準じて運用を指向し、民間で最も開発が進んでいるところに重点配分を行って開発を促進するという条件を示しても良いのではないかと考えられる。 | 低損失パワーエレクトロニクス早期実用化のために、基本計画では、実用化に向けた開発と基盤技術開発を並行して進めることにしています。実用化に向けた開発については、委託先審査において実用化への取り組みと応募者の技術面の実力を重要な判断条件とし、実用化に資することとしています。 | 特になし |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | [意見２]今回のプロジェクトに、パッシブデバイス（インダクタ・コンデンサ等）の技術開発が含まれないのはなぜですか。また、パッシブデバイスの高周波化小型化高密度化低損失化など別のプロジェクトで扱う用意はあるのでしょうか。今回のプロジェクトにパッシブ素子の高周波化低損失化にかかる技術開発項目を加えることは無いのでしょうか？ | 低損失パワーエレクトロニクス技術開発において受動素子開発も重要であると認識しています。予算の制約もあり、本事業では、まずワイドギャップ半導体開発を通じてパワーエレクトロニクスの革新を実現していきます。その他の技術開発については、本課題が進捗した時に改めて検討します。 | 特になし |
| | １．研究開発の目的<br>(2)研究開発の目標 | | |
| | [意見１] 家電等への適用を考えますと、電力損失 10 分の 1 で十分な CO2 排出削減効果が期待でき、コストへの寄与度が最も高いと予測される SiC チップ面積をいかに小さくするかが問題です。MOS 損失と SiC チップ面積を関連付けた理論的予測にもとづく目標値設定や研究開発内容の展開が必要かと思われます。 | 基本計画では、開発するインバータの定格に応じて柔軟に性能目標を設定するようにしています。具体的な開発対象製品に即した目標値や研究実施計画を設定するように、指摘事項を考慮して運営します。 | 特になし |
| | [意見２] インバータユニットの電力変換装置損失を 30%に低減とありますが、基盤技術の確立時期が平成 20 年度までであるなら、目標値が低すぎるように思われます。また、SiC スイッチング素子の損失低減に対する寄与度も曖昧です。さらに、コストと関連の強いインバータユニットの大きさ（体積）について、研究開発の目的に掲げているにもかかわらず目標値の設定がありません。 | SiC の物性から定まる理論値や技術動向を考慮すると、30%という目標値は高いハードルだと考えています。容積については、冷却方法等さまざまな要因が係わってくるので具体的な目標は設定していません。 | 特になし |
| | (3)研究開発の内容 | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | [意見１]本開発の成果を基に遅滞なく、実用化をめざす、という観点からはデバイスメーカーとウエハメーカーの密接な関係が構築されることが極めて重要であり、この『管理』することがその促進に資するとは考えにくいと思われる。 | SiC パワーエレクトロニクス素子開発の課題として、ウェハ欠陥と素子特性の関連付けが重要です。プロジェクト全体で、評価方法の標準化を含め、多数のデータを集積・管理することで、個別のデバイスメーカーと個別のウエハメーカーとの連携では為し得なかった研究開発の促進ができると考えます。 | 特になし |

以上

２．分科会における説明資料

　次ページより、プロジェクト推進・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

ITイノベーションプログラム／エネルギーイノベーションプログラム

# 「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」（事後評価）

（2006年度～2008年度　3年間）

# プロジェクトの概要　（公開）

NEDO技術開発機構　電子・情報技術開発部
三菱電機、 新機能素子研究開発協会、
産業技術総合研究所

2009年 9月3日



5. プロジェクトの概要説明

5．１　事業の位置づけ・必要性

5．２　研究開発マネジメント

5．３　研究開発成果

5．４　実用化の見通し

公開

## 社会的背景

**地球温暖化対策は喫緊の世界的、国家的課題**

⇩

**抜本的$CO_2$排出抑制、省エネ技術の必要性**

## 事業の目的

**SiCパワーエレクトロニクスの実用化による**
**省エネ／低炭素社会の実現**

⇩

**低損失、高耐圧、高耐久性に優れるSiCパワーデバイスとこれを用いたインバータの基盤技術を開発**





公開

## 産業技術政策上における位置付け

**経済産業省　研究開発プログラム「ITイノベーションプログラム」及び「エネルギーイノベーションプログラム」の1テーマとして実施**

| 産業技術政策 | | |
|---|---|---|
| | 第3期科学技術基本計画 | ■ 継続的イノベーションを具現化するための科学技術の研究開発基盤の実現<br>■ 革新的IT技術による産業の持続的な発展の実現<br>■ すべての国民がITの恩恵を実感できる社会の実現 |
| | IT新改革戦略 | ■いつでも、どこでも、誰でもITの恩恵を実感できる社会の実現 |

⇩

経済産業省

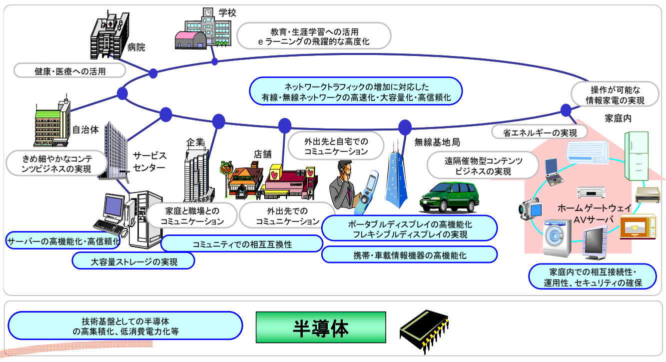
- 実行プログラム1　ITイノベーションプログラム
  - ● 省エネ革新
    - パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発プロジェクト
- 実行プログラム2　エネルギーイノベーションプログラム（①総合エネルギー効率の向上）
  - ●次世代省エネデバイス技術
    - パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発プロジェクト

事業原簿　1－5項

公開

# NEDO中期目標における位置付け

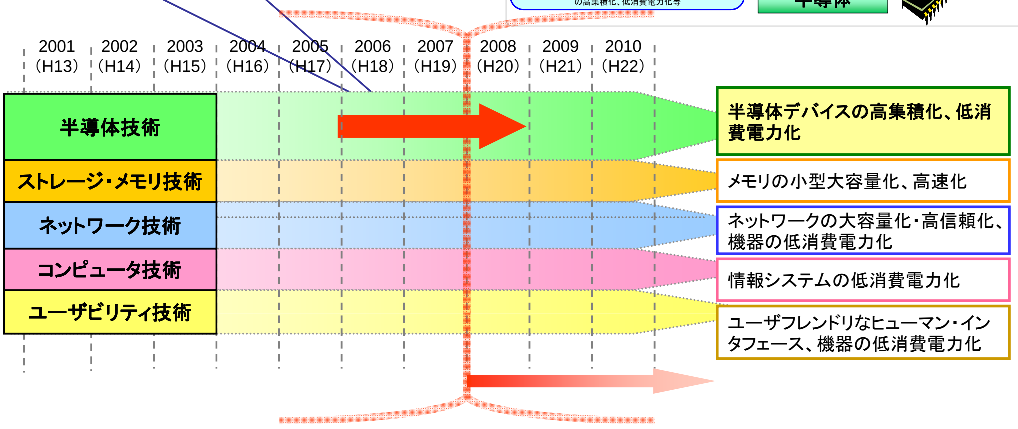
**NEDO中期目標に掲げる「高度な情報通信社会の実現」のため、電子・情報技術開発分野の半導体技術開発の一環として実施。**




## NEDO　中期目標

- ■ 誰もが自由な情報の発信・共有を通じて、個々の能力を創造的かつ最大限に発揮することが可能となる高度な情報通信（IT）社会の実現
- ■ 我が国経済の牽引役としての産業発展の促進

「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発プロジェクト」





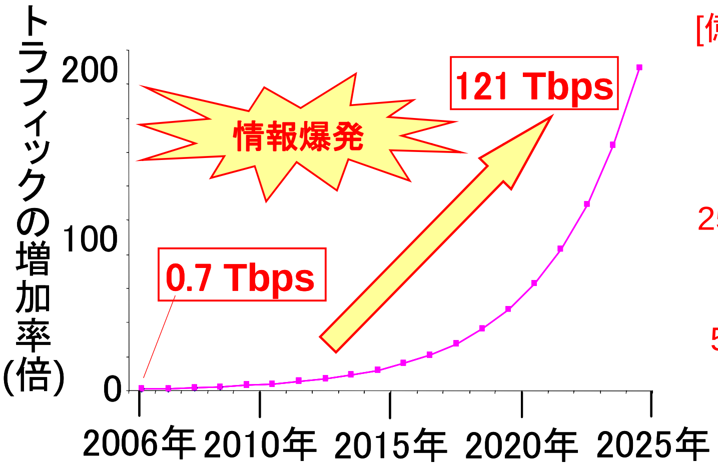



公開

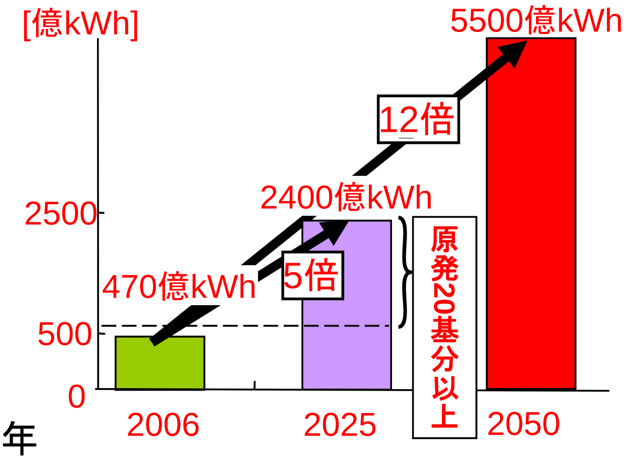
# IT機器の低消費電力化の必要性

ブロードバンドの普及
IT機器の高性能・多機能化
設置台数の急激な増加

⇨ 消費電力の急激な増大




インターネット内の情報流通量の推計（'06-'25）

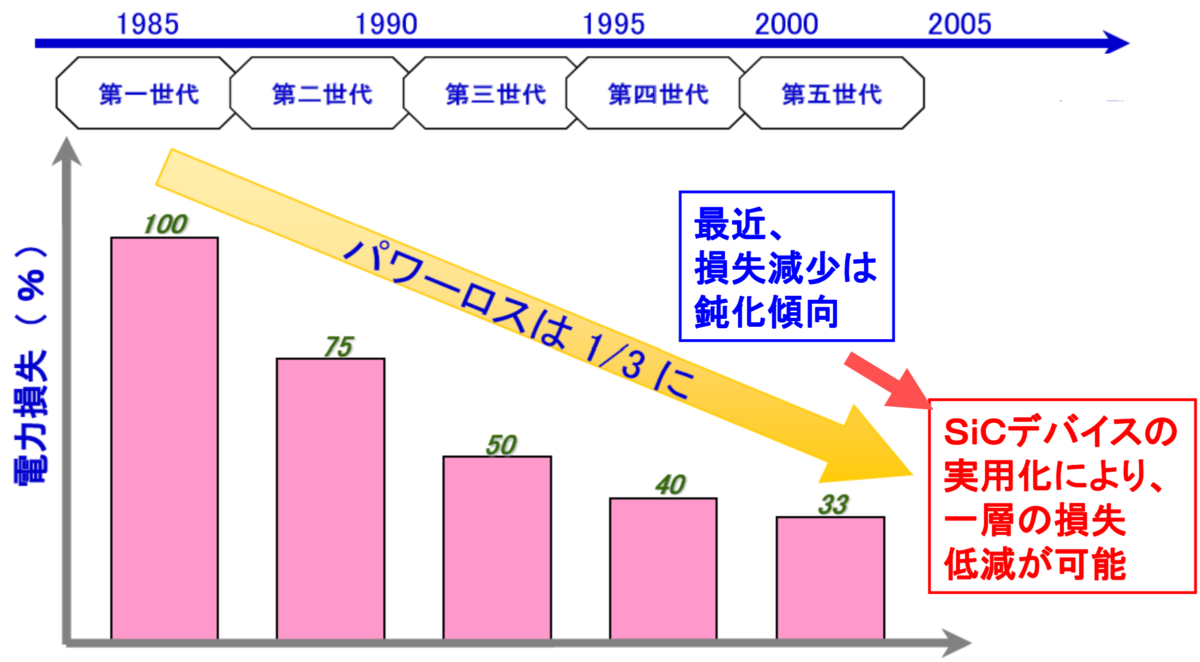



サーバ、ネットワーク機器、PC及びディスプレイの消費電力量

出所：グリーンITイニシアチブ会議資料（2007年12月6日）

# これまでのパワーデバイスの損失の変遷

・パワーデバイスの電力損失は20年間で約1/3まで低減されてきた。
・更なる高性能化の要求に応えるためには、“イノベーション”が必要。








## ワイドギャップ SiC の物性的優位性（対 Si ）

| | SiC/Siの比 | SiC値：Si値 |
|---|---|---|
| ① バンドギャップ ［ev］ | ～3倍 | 3．2 ： 1．1 |
| ② 絶縁破壊電界 [$10^6$V/cm] | ～10倍 | 3．0 ： 0．3 |
| ③ 飽和電子速度 [$10^6$Vcm/s] | ～2倍 | 22 ： 10 |
| ④ 熱伝導率 ［W/(cm・K)］ | ～3倍 | 5．0 ： 1．5 |

## SiCをデバイス化した時の特長

・耐電圧が大きい。高温での動作が可能。
・厚みを薄くできるのでデバイスのオン抵抗値が小さい。
・速いデバイス ＝ 高周波特性が良い。
・熱伝導性が良く、高パワー密度に対応できる。

事業原簿　1頁

公開

# 半導体分野のNEDO技術ロードマップ（2009年版）における位置付け

| 技術分野 | 分野構造 | | | | 評価パラメータ | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 大項目 | 中項目 | 小項目 | 重要課題 | DRAMハーフピッチ（nm）→ | 52 | 45 | 40 | 36 | 32 | 28 | 25 | 22.5 | 20 | 17.9 |
| | | | | | shメモリハーフピッチ（nm）→ | 40 | 36 | | | | | | | | 4.2 |
| | | | | | ジックM1ハーフピッチ（nm）→ | 52 | 45 | | | | | | | | 7.9 |
| | | | | | ロジックノード（nm）→ | 32 | 28 | | | | | | | | |
| 半導体 | ディスクリートデバイス | パワーデバイス | ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス | 高出力パワー密度 | 変換器出力パワー密度（W/cm$^3$） | | 10 | | | | | | | | |
| | | | | 低損失 | MOSFET ON抵抗(mΩcm2)@耐圧 | | 5@1.2kV | | | | | | | | |
| | | | | 大容量 | 定格電流 (A) @耐圧 | MOSFET: 10 @600V | MOSFET: 10 @1.2kV | 30 @600V | | @600V | 60 @1.2kV | 200 @600V | 200 @1.2kV | | |
| | | | | | 基板転位密度 (cm$^{-2}$) | | | | 500 | | | 100 | | | |
| | | | | 材料・プロセス・デバイス技術 | 材料・デバイス構造 | SiC-SBD → | → | → | → | → | → | → | → | → | → |
| | | | | | | SiC-MOSFET → | → | → | → | → | → | → | → | → | → |
| | | | | | | | | | | | | SiC-パワーIC → | → | → | → |
| | | | | | | | | | | | SiC-IGBT → | → | → | → | → |
| | | | | | | | GaN-スイッチング HFET: ノーマリON → | → | → | → | → | ノーマリOFF → | → | → | → |
| | | | | 回路・制御技術 | 回路・制御技術 | ワイドバンドギャップ半導体デバイス特性に適した回路・制御技術 → | → | → | → | → | → | → | → | → | → |
| | | | | 実装技術 | 高温実装 | → | → | → | → | → | → | デバイス温度225℃動作実装技術 → | → | → | → |

SiCパワーデバイス技術（材料・プロセス、回路・制御、実装）の開発RMが描かれている。

事業原簿　1頁

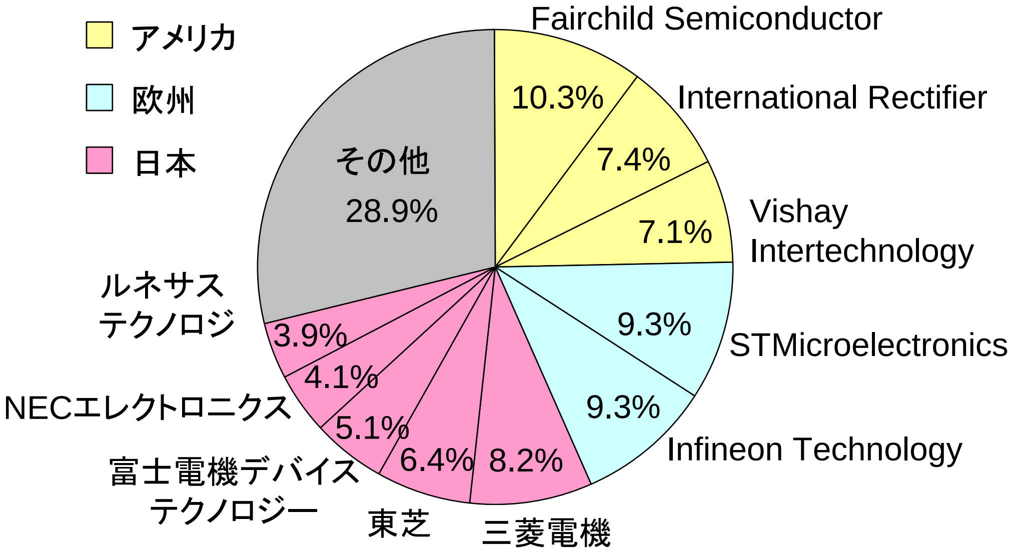




公開

# 日本企業の競争力

**現在、世界全体の約1/3以上のシェアを日本企業が有するが、今後も日本が国際的に優位な位置を占めるには、国家プロジェクトの推進が不可欠。**



公開

# SiCデバイス開発に向けた各国の取り組み状況（1）

・ウェハ量産技術では米国に大きく遅れ。
・デバイスでは、SiCダイオードの製品化で欧州に実績あり。

| | 企　業 | 概　要 | 動　向 |
|---|---|---|---|
| 日　本 | 三菱電機／ローム／日立／東芝／パナソニック／デンソー／富士電機デバイステクノロジ／新日鐵／昭和電工など | 10年以上にわたり基礎技術研究、インバータ基盤技術開発を実施。国家支援により、実用化検討ができる段階まで技術レベルが向上。 | ウェハでは新日鐵、デンソーが取り組み。デバイス、応用機器までの研究開発を推進。 |
| 米　国 | Cree／Semisouth／NorthropGrumman | DARPAの資金により育成されたCree社のウェハ、エピ、デバイス技術は世界トップレベル。ウェハの量産技術は特に強い。GaN－LED用基板としてのSiC基板でビジネスが成立。 | ウェハの技術、シェアともにトップレベルのCree社を中心に展開。 |
| 欧　州 | Infineon/STマイクロエレクトロニクス／Sicrystal | Infineon社はSiCダイオード製品化の先駆。近年、STマイクロ社も量産開始。太陽光発電用としてドイツのフラウンフォッファー研究所がAll－SiCインバータに取組。 | ウェハはSicrystal社（世界シェア第3位）が有力。SiCダイオードに実績のあるInfineon社に優位性あり。 |

事業原簿　6～7頁



1. 事業の位置付け・必要性について　（1）NEDOの事業としての妥当性

公開

# SiCデバイス開発に向けた各国の取り組み状況（2）

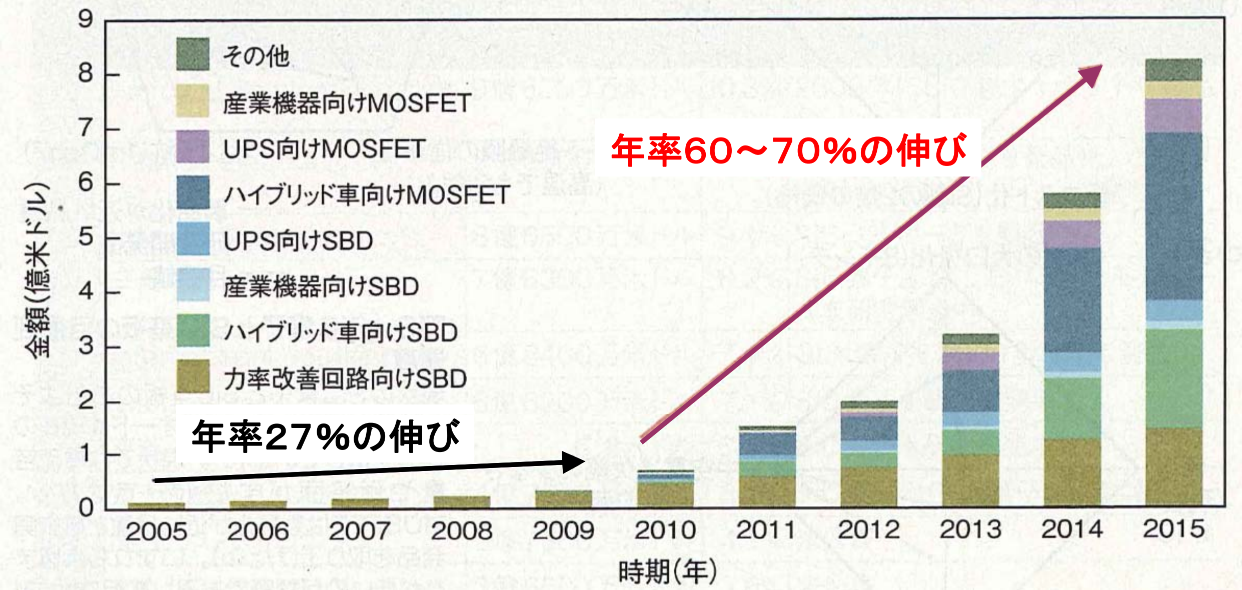
| | 団体 | 概　要 | 技術動向 | 優位性 |
|---|---|---|---|---|
| 日　本 | 新機能素子研究開発協会（1981年） | ○日立、東芝、三菱電機、日本電気、富士など27社による財団法人。<br>○産総研、各大学とも連携し、研究開発を推進。 | ウェハからデバイス、応用機器までの研究開発。 | ○ |
| 米　国 | CPES（Center for Power Electoronics Systems）（1998年） | ○バージニアエ科大学など5大学、インテルなど80社のコンソーシアム<br>○資金は1998年～2008年までで60～70億円<br>○研究活動は、①NSFによる資金をベースとするもの、②会員企業からの会費に基づくもの、③個別共同研究契約に基づくもの、に分けられる。 | 研究分野は、個別領域では、①先進的パワー半導体技術、②実装対応型材料技術、③高密度実装技術、④発熱対応実装技術、⑤制御及びセンサ実装技術を対象にするとともに、統合技術としては、①統合パワーエレクトロニクスモジュールベース電力変換技術及び②統合パワーエレクトロニクスモジュール応用技術(標準モジュール、モータドライブ向けモジュール及び高出力向けモジュール)を扱う。 | ○ |
| 欧　州 | ECPE(European Center for Power Electoronics)（2003年） | ○CPESの活動に危機感を強めた欧州の企業主導で設立した。（現在はABB、ALSTOM、BOSCHなど32社）<br>○活動内容は①Pre-competitiveな研究の推進(パートナー探しのプラットフォーム)②教育・人材育成と仕事の紹介③PRとロビー活動。Principal Partnerのお金を大学に与え研究を行う場合は資金は主要パートナーからの総額10億円程度。 | ECPEの問題としては、ドイツ国の色合いが強いこと、中立性を保つために戦略的にアクションは起こしにくいこと、などがある。 | ○ |

事業原簿　6～7頁

公開

## SiCデバイスの市場予測

- 2010年以降、SiC素子の市場は大きく伸び、
- 2015年には約800億円の市場規模が予測される。




出展：日経エレクトロニクス　2008.11.17



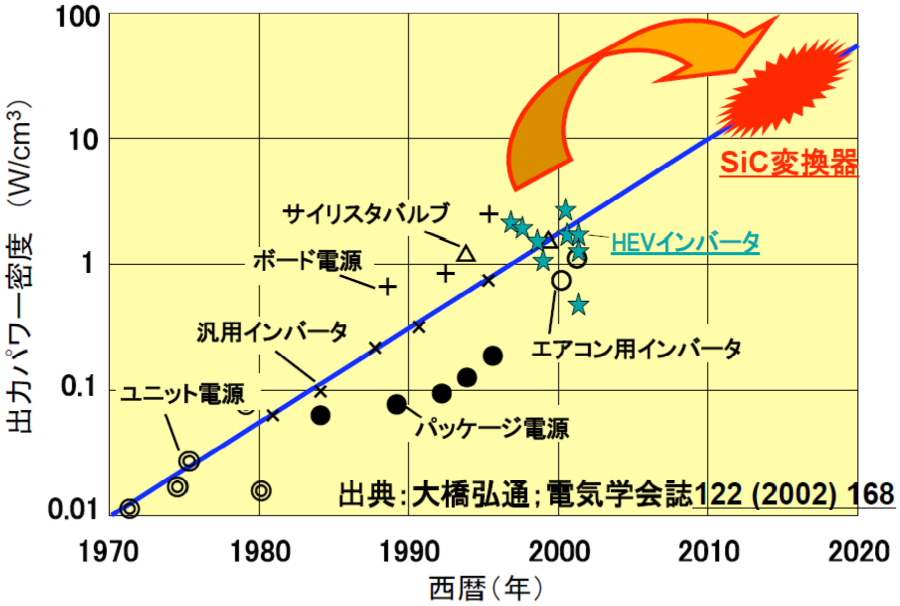
1. 事業の位置付け・必要性について　（1）NEDOの事業としての妥当性

公開

## 国内外の研究開発の動向；事業目的の妥当性

### SiCデバイス開発の世界動向

電力変換器のパワー密度は、この30年で2桁向上した。
高パワー密度化は電力変換器に求められるトレンドである。

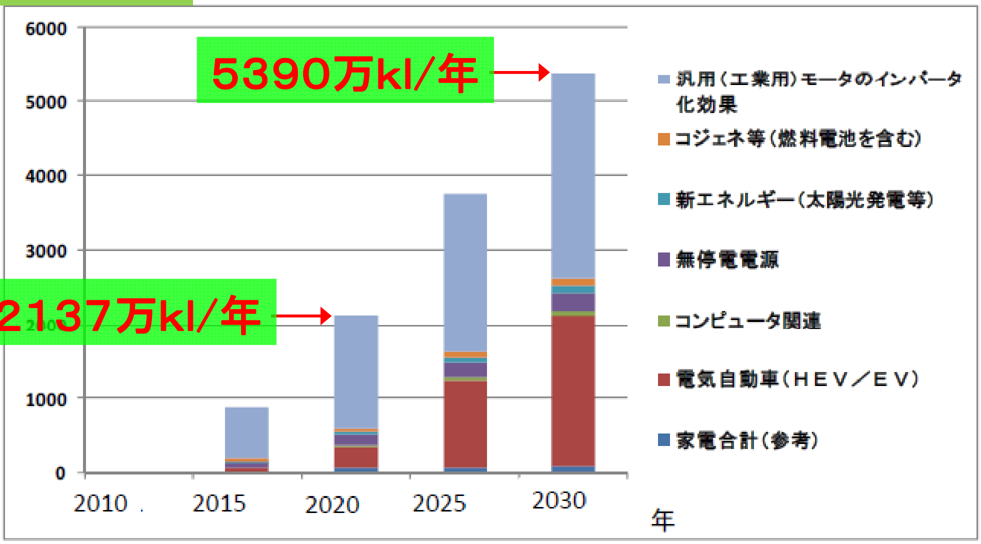


公開

# 省エネルギー効果

## 2030年までのSiCデバイス適用による省エネ効果予測

（原油換算：万kl／年）




（汎用インバータによるインバータ化効果を入れた場合）

《次世代省エネデバイス》（NEDO省エネローリングのFED再委託調査）

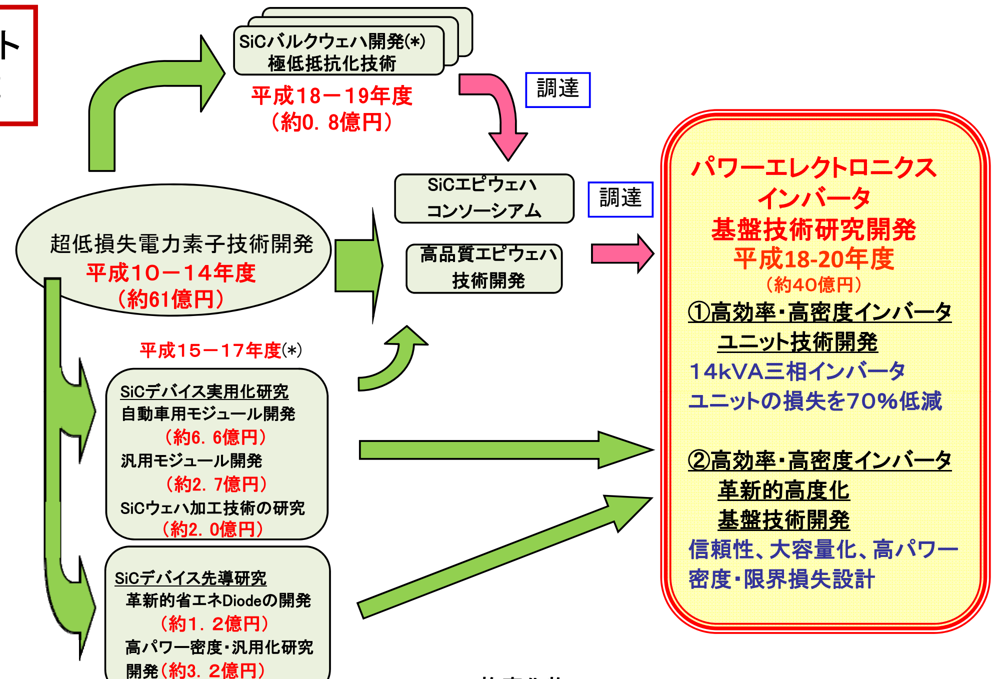
事業原簿　3～5頁





公開

# 本プロジェクトに至る経緯




Ⅲ族窒化物

窒化物半導体を用いた低消費電力型高周波デバイスの開発（H14～H18）（約32億円）

(*)「エネルギー使用合理化技術戦略的開発事業」

：技術流れ　：ウェハ流れ

**SiC半導体／デバイス事業化／普及戦略調査研究**

事業原簿　7頁

公開

## NEDOプロジェクトとしての必要性

**情報通信技術の公共性、民間企業だけでは開発が困難なこと、技術的英知結集の必要性から、NEDOプロジェクトとして取り組むことが必要。**

### ◆ 情報通信技術は、高度情報化社会の実現に不可欠

本プロジェクトは、高度情報化社会の実現に不可欠なSiCパワエレ技術の高度化が目的。

### ◆ 個々の民間企業では、技術開発は困難

SiCインバータの実用化には、多岐に亘る高難度のパワエレ基盤技術開発が必要。
市場原理のみによってSiCインバータの実用化を図ることは困難。

### ◆ 産官学連携による技術的英知の結集が必要

我が国のパワエレ技術分野における技術優位性と産業競争力を確保するには、
産官学連携による基盤技術の早期解決が必須。

↓

**NEDO技術開発機構が関与すべき事業**

**「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」プロジェクト**

研究開発項目
- ①高効率・高密度インバータユニット技術開発
- ②高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発





公開

## 実施の効果　（費用対効果）

◇ 費用の総額　：　**40．4億円**

↓

◆ 市場の効果(2015年時点)　※成功確率100%で計算

SiCデバイス市場（世界）　：　**約800億円**

◆ 省エネルギー効果（SiCデバイス利用効果）

**2137万kl/年**　（2020年推定、原油換算）

**5390万kl/年**　（2030年推定、原油換算）

事業原簿　1～4頁

# 5. プロジェクトの概要説明

5．１　事業の位置づけ・必要性
5．２　研究開発マネジメント
5．３　研究開発成果
5．４　実用化の見通し





公開

## 研究開発目標 と根拠

| 研究開発項目 | 研究開発目標（最終） | 根 拠 |
|---|---|---|
| ①高効率・高密度インバータユニット技術開発 | 具体的な製品応用を想定したSiCを用いた低損失インバータユニットを試作し、電力変換損失を同一定格のSiインバータユニットの30％以下に低減する。 | 産業用モータ応用を目的とした汎用インバータにおいて、SiCスイッチング素子を用いたオールSiCインバータユニットを試作し、Siと比較して変換損失を大幅に低減することを実証し、SiCパワーデバイスの価値を示すことが必要。 |
| ②高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発 | （1）インバータ大容量化技術<br>・SiCウェハの品質とその上に試作したスイッチング素子特性の関連を明確化。<br>・スイッチング素子の大容量化：5mm角級チップを試作し、電流容量100Aの達成条件を明確化。 | Siデバイスに対して明確な代替価値を見出す為には、SiCワンチップの大電流容量化が必須。これはSiCウェハ結晶欠陥をクリアできれば物性的に可能。その条件の明確化こそ実用化に必須の課題。 |
| | （2）インバータ信頼性向上基盤技術<br>SiCスイッチング素子の信頼性評価手法を開発し長期信頼性を決める要因を明確化。最大の課題であるMOSスイッチング素子の酸化膜について 5mm角級チップを試作し、実用素子に求められる信頼性を達成する条件を明確化。 | ノーマリオフ素子が可能であるMOSFETにおいて、ゲート酸化膜および酸化膜／SiC界面での信頼性の確保が、従来からの重要課題であり、信頼性達成の要件を得ることが必要。 |
| | （3）インバータ高パワー密度化基盤技術<br>素子当り10A以上のSiC低損失MOSスイッチング素子（オン抵抗 2～5mΩcm$^2$、耐圧0.6～1.7 kV）の開発を行う。インバータ損失の限界設計技術を開発し、高パワー密度（50W/cm$^3$以上）のSiCインバータ実現の条件・見通しを明確化。また、高速制御技術及び高温（250℃）環境で動作可能な実装技術の指針を提示。 | インバータは高エネルギー密度化すなわち高性能化することにより、小型化し製品価値の向上に繋がる。SiCデバイス応用によるその究極点およびもう一つ長所である高温での動作が可能であるという点について、見極めることがSiCパワーデバイスの将来展望を持つことに繋がる。 |

事業原簿　9頁

公開

# 開 発 予 算

（単位：百万円）

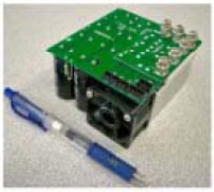
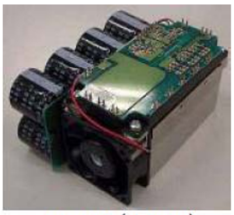
| | '06 | '07 | '08 | 合計 |
|---|---|---|---|---|
| ① 高効率・高密度インバータユニット技術 | 656 | 368 | 250 | 1,274 |
| ② 高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術開発 | 1,411 | 721 | 638 | 2,770 |
| 合　計 | 2,067 | 1,089 | 888 | 4,044 |





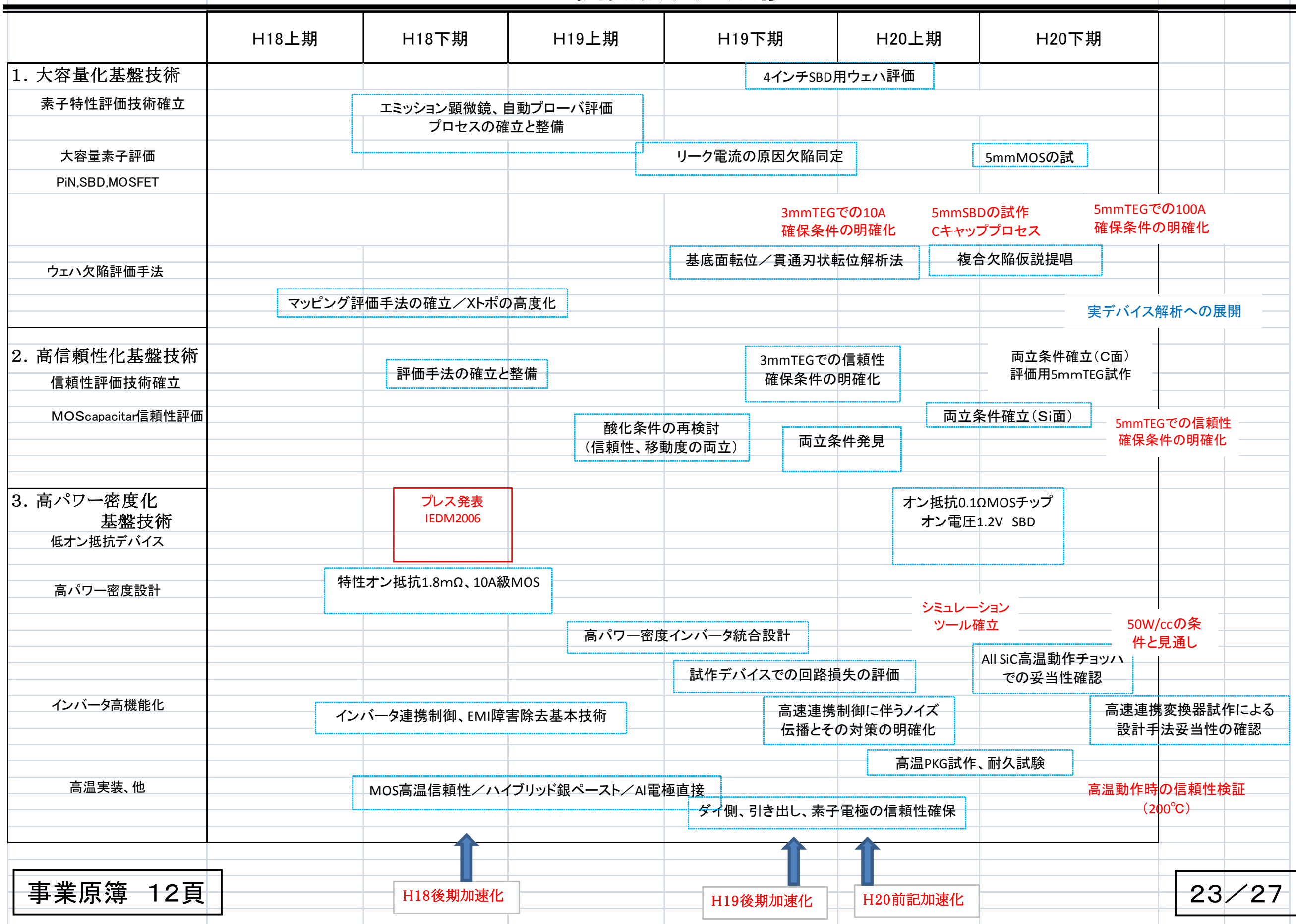
公開

# 研究開発のスケジュール（1）

| | 平成18年度（2006） | 平成19年度（2007） | 平成20年度（2008） |
|---|---|---|---|
| 高効率・高密度インバータユニット技術開発 | セル構造微細化検討 → | 素子構造最適化 → | 素子、モジュール試作 → |
| | 動特性評価、駆動法検討 → | kW級インバータ評価<br>限界性能検証、並列駆動技術 → | 14kVAインバータ試作・評価 → |
| | | 高キャリア動作基礎評価 → | 高キャリア動作効果検証 → |
| | | <br>3.7kW | <br>14kVA（11kW） |

| 予算合計 1,274百万円 | 656百万円 | 368百万円 | 250百万円 |
|---|---|---|---|

# 開発計画と進捗



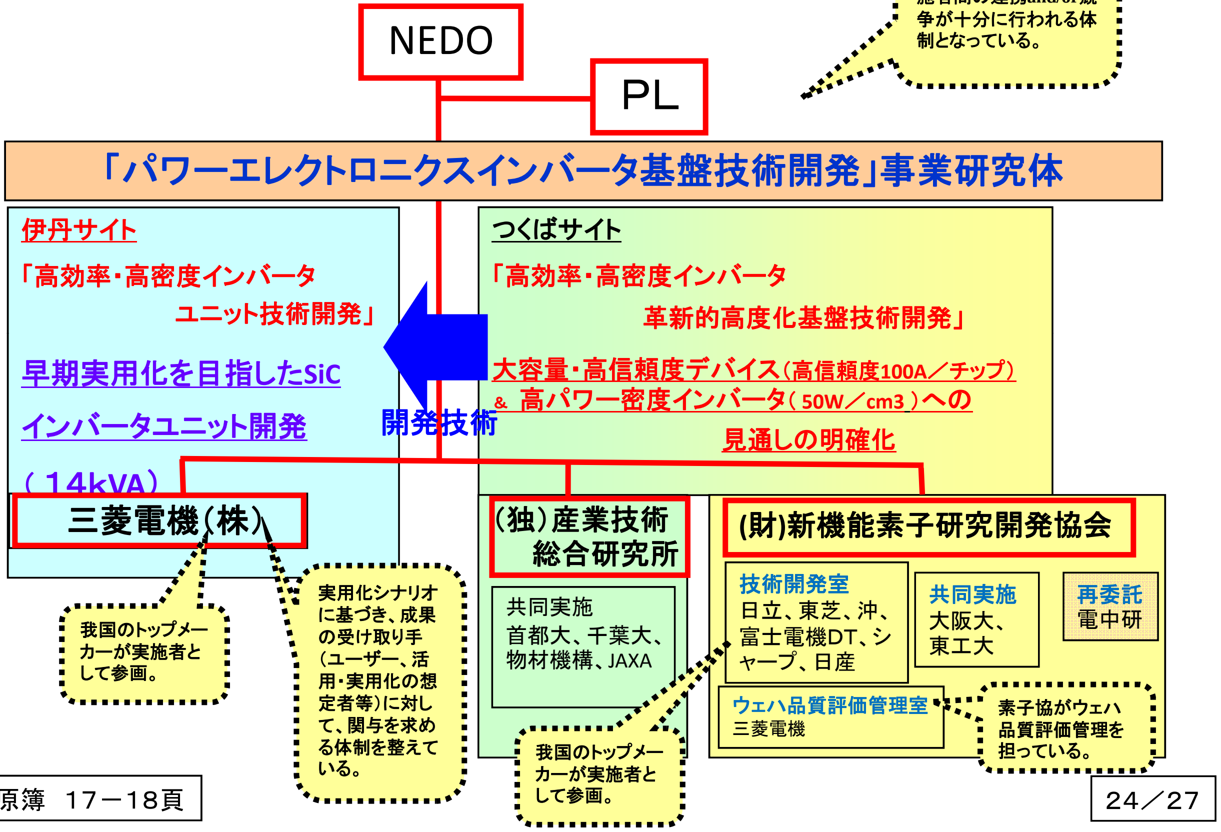

事業原簿 12頁



## 2. 研究開発マネジメントについて　(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

公開

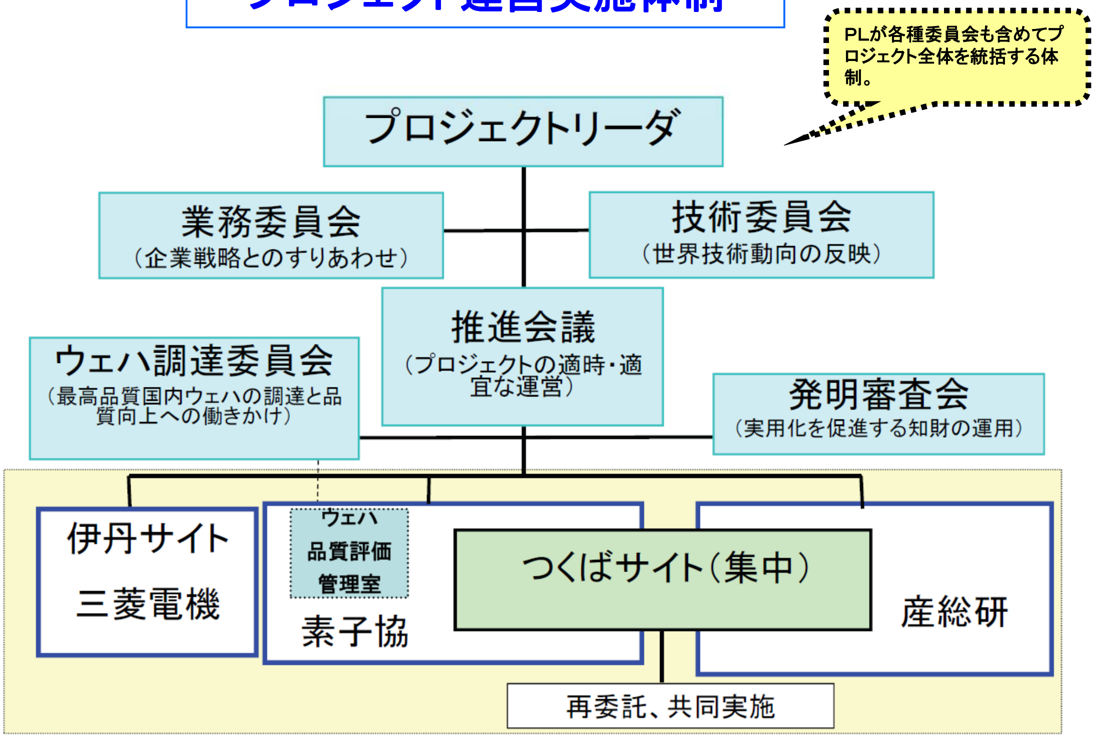
# 研究開発の実施体制




事業原簿 17－18頁

公開

# プロジェクト運営実施体制










公開

# 加速財源投入実績（2006～2008年度）

| 件名 | 金額<br>（百万円） | 目的 | 成果 |
|---|---|---|---|
| **2006年度**<br>高効率・高密度インバータユニット技術の開発促進のための露光装置と高輝度X線分析装置の購入 | 335 | 世界で最小のオン抵抗値を持つIEMOSFETの開発・実証を行ったことから、更にSiCウェハの結晶欠陥低減に資するデバイスの特性分析とデバイス製造要素技術の高度化を図る。 | SiC素子化に必要な露光装置と高輝度X線分析装置の導入により、電気特性と結晶欠陥の対応付けが加速されたことにより、デバイスキラー欠陥がより明らかになり、プロジェクト目標達成が加速された。 |
| **2007年度**<br>高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術の開発促進のための4インチウェハ、インライン4インチウェハ評価設備、インバータ動作評価装置の購入 | 240 | 確立したSiC基板欠陥評価方法を用いて、4インチウェハ評価を実施し、三菱電機において、ダイオード試作評価を実施する。これにより、素子特性劣化メカニズム解明に資する共に、実用化のためのプロセスコストの低減を図った高効率インバータ実現に向けての課題解決に資する。また、フィルター等の小型化が期待できるインバータの高キャリア周波数化に関し評価検討を行い、その効果を検証。 | 国産の4インチウェハが米国Cree社製と同等の品質との評価結果を得た。また、4インチウェハ上デバイス試作の加速としてインライン評価が可能な4インチ対応プロセスを準備すると共に、SiCインバータ回路の高周波動作評価を行った。 |
| **2008年度**<br>高効率・高密度インバータ革新的高度化基盤技術の開発促進のためのカーボンキャップ装置の購入 | 85 | SiCを用いたインバータ実用化に向けては、材料欠陥・プロセス起因欠陥の低減によるデバイスの歩留まり信頼性向上が求められており、そのための基盤技術の確立を図るためにもプロセス起因欠陥においては、イオン注入後に行う活性化熱処理によるウェハ表面荒れが最も大きな課題であった。これを回避できる手法を確立する。 | SiCデバイスプロセスのボトルネックであった活性化熱処理に関し、カーボン保護膜で表面荒れを抑制できるプロセスを見出し、100A級SiC-SBDや10A級SiC-MOSFET（IE-MOS）の試作に成功。IEMOSについては、加速資金で導入したカーボンキャップ装置による耐圧歩留まり向上を確認し、インバータ回路での評価に使用する10A級IEMOSを製作した。 |

公開

# 1. PL主催による「プロジェクト技術委員会（年2回）」開催

＊＊＊　外部有識者の意見を運営管理に反映　＊＊＊

① 東京大学 正田 英介 名誉教授
② JSTイノベーションプラザ京都 松波 弘之 館長
③ 横浜国立大学 河村 篤男 教授
④ ㈱NTTファシリティーズ 池辺 裕昭 常務取締役
⑤ トヨタ自動車㈱ 車輌技術本部 川橋 憲 主査

＜反映内容＞

◇ ウェハ⇔デバイス特性評価の徹底とプロジェクトのサイト間の連携：
実用化実証の企業サイトより4インチウェハの評価のため、
つくばサイトのウェハ品質評価管理室に研究者を派遣。

◇ インバータのエネルギー密度の評価基準（体積、熱損失計測）のレベル合わせを実施。

# 2. その他、以下の委員会を開催

「推進連絡会議」：プロジェクトの適時・適宜な運営
「業務委員会(年2～3回)」：企業戦略とのすり合わせ
「ウェハ調達委員会(月１回)」：高品質国内ウェハの調達と品質向上への働きかけ
「発明審査会」：適切な出願と実用化を促進する知財の運用

## 5. プロジェクトの概要説明


5. １　事業の位置づけ･必要性

5. ２　研究開発マネジメント

5. ３　研究開発成果

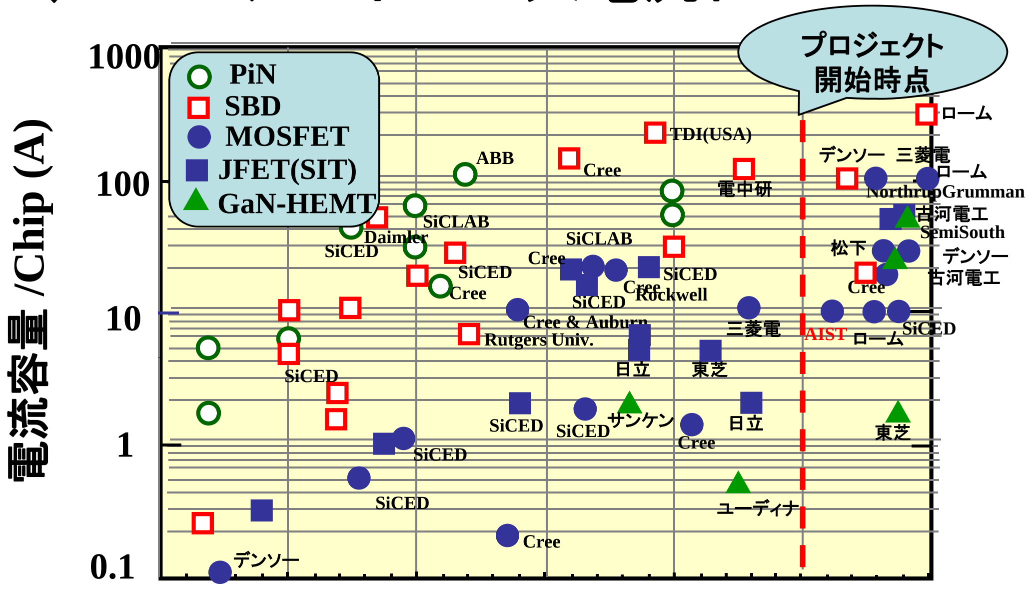
5. ４　実用化の見通し






公開

# SiC、 GaNデバイスの大電流化のトレンド




オールSiCパワーデバイスによる変換器の低損失化の実証

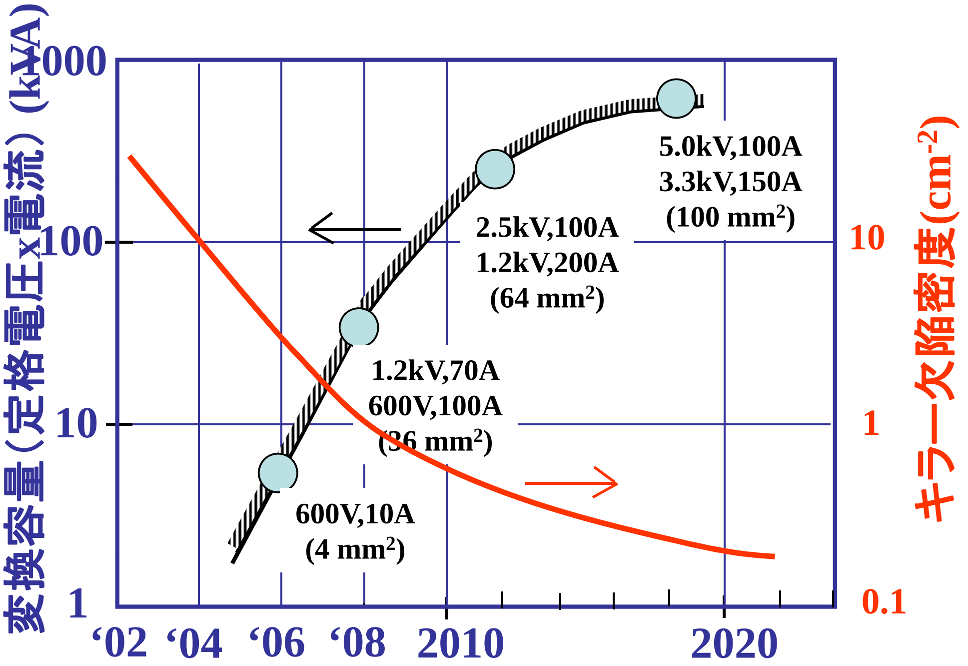
チップ当たりの電流容量が100Aを超えるスイッチング素子の開発

世界的にみて未開拓なSiCパワーデバイスの信頼性のR&D

事業原簿　１－２頁

公開

# 電圧，電流容量のトレンド予想




SiCパワーデバイスの本格的な実用化には結晶の品質の見極めが早急の課題

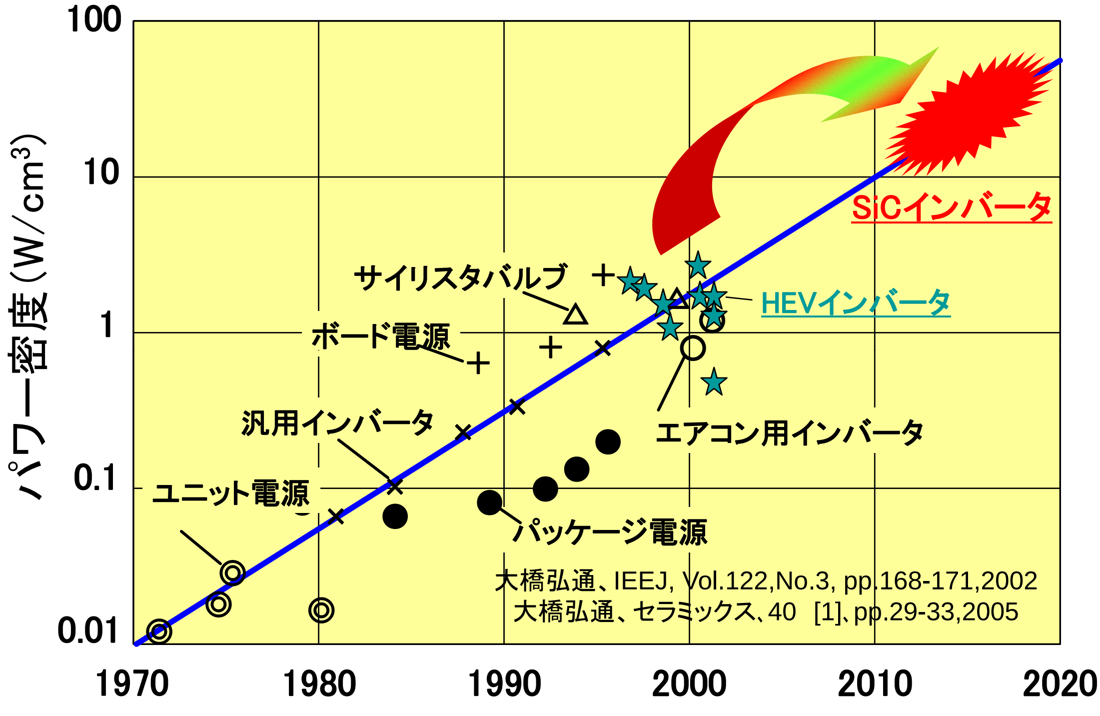
事業原簿 1−2頁





公開

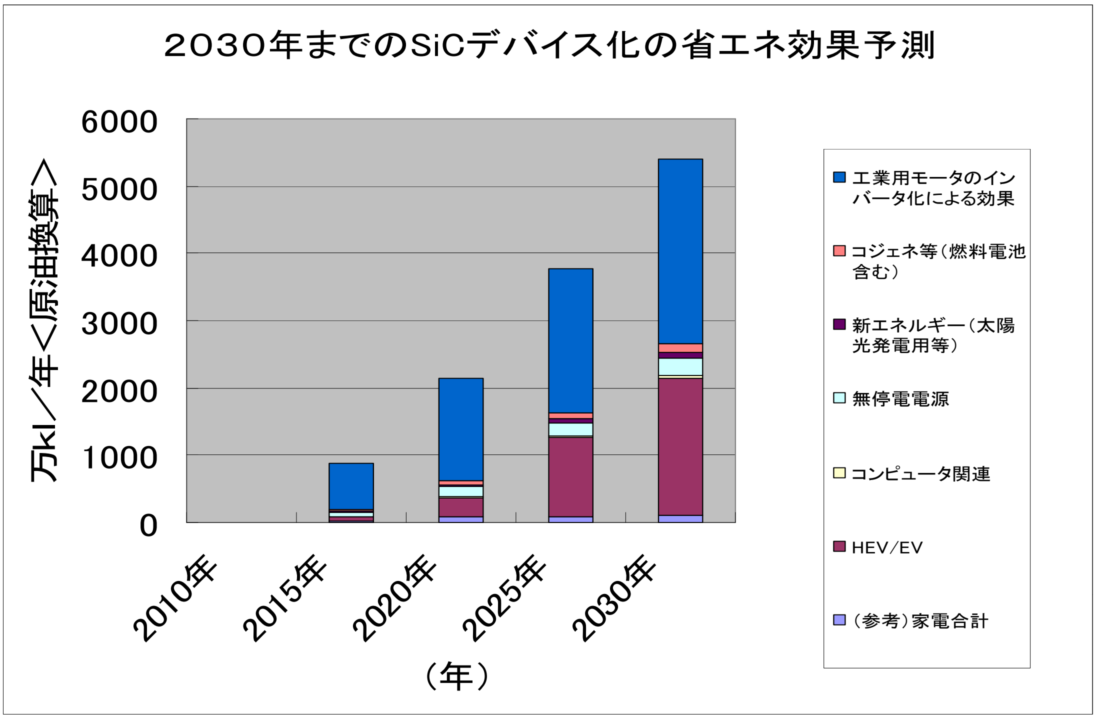
# 電力変換器のパワー密度のロードマップ




電力変換器のパワー密度（大きさの指標）はこの30年で2桁向上した。
変換器のコストパフォーマンスの指標ともいえる。

事業原簿 7頁

# 2030年までのSiCデバイス適用による省エネ効果予測



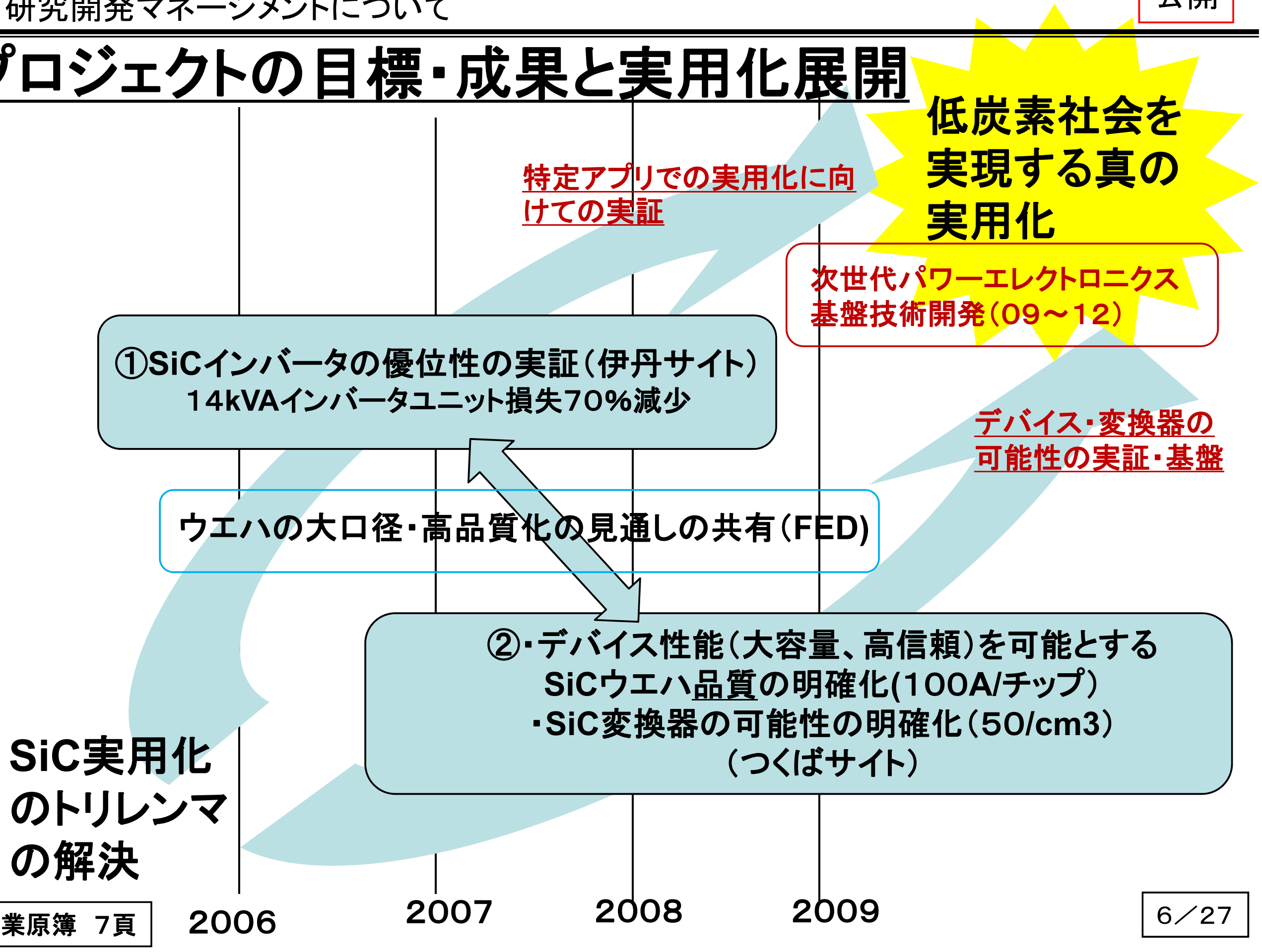

（汎用インバータによるインバータ化効果を入れた場合）

≪次世代省エネデバイス≫（NEDO省エネローリングのFED再委託調査）

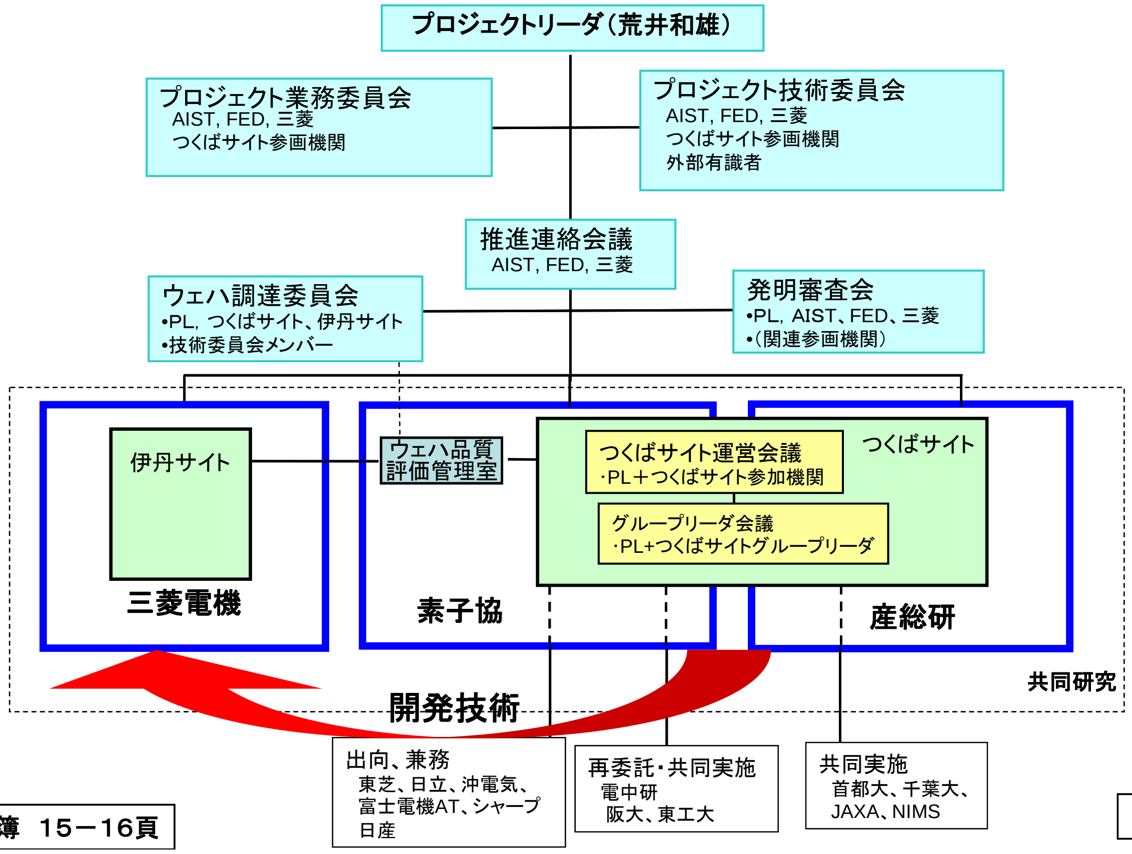




# プロジェクトの目標・成果と実用化展開



# プロジェクト体制







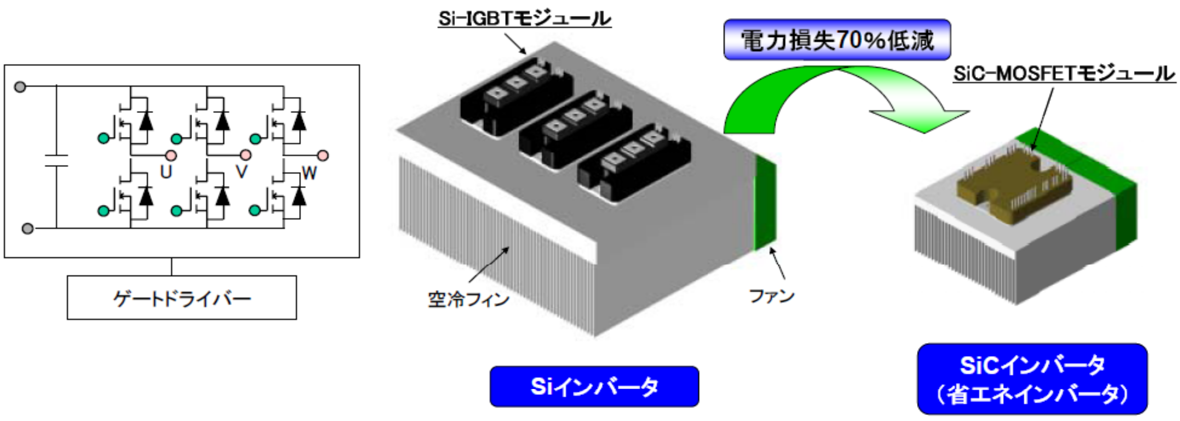

## 研究開発項目① ：
## 高効率・高密度インバータユニット技術開発

**研究内容**

インバータ用スイッチング素子の高性能化技術開発を行うと共に、それら高性能スイッチング素子を用いた高効率インバータユニットプロトタイプの試作を行い、その有効性（低損失性）を実証する。

**目標**

SiC-MOSFET（素子耐圧：1200V）を用いた三相インバータユニット（AC400、14kVA）を試作し、同一定格のSiインバータと比較して変換損失を70%低減することを実証する。



公開

# 開発の内容

## 高効率・高密度インバータユニット技術開発

| 開発項目 | 目標 |
|---|---|
| 高効率･高密度インバータユニット技術開発 | 具体的な製品応用を想定したSiCスイッチング素子を用いたインバータユニットを試作し、同定格のSiインバータユニットと比較して変換損失を大幅に低減することを実証する。<br>出力電圧（AC 400 Vrms、60 Hz）、出力電流（AC 20 Arms）、出力容量（14 kVA）の3相インバータユニットを試作し、その損失が同定格のSiインバータの30%以下であることを実証する。 |
| 高キャリア周波数化検討<br>（2007年度秋追加） | ＊インバータの高キャリア周波数化（＞15kHz）に関し評価検討を行い、高キャリア周波数化効果を明確にする。 |

| 開発項目 | 目標 | 実績 | 評価 |
|---|---|---|---|
| 高効率･高密度インバータ技術開発 | 具体的な製品応用を想定したSiCスイッチング素子を用いたインバータユニットを試作し、同定格のSiインバータユニットと比較して変換損失を大幅に低減することを実証する。<br>出力電圧（AC 400 Vrms、60 Hz）、出力電流（AC 20 Arms）、出力容量（14 kVA）の3相インバータユニットを試作し、その損失が同定格のSiインバータの30%以下であることを実証する。 | 5mm□SiC-MOSFETとSBDを用い、14kVA（11kW出力）/400Vインバータユニットを設計、試作した。11kW出力時に損失がSiインバータの30%であることを確認し、最終目標を達成した。 | ○ |
| 高キャリア周波数化検討 | インバータの高キャリア周波数化（＞15kHz）に関し評価検討を行い、高キャリア周波数化効果を明確にする。 | 上下アームのスイッチングにおけるデッドタイムを1μsecに短縮することで、30kHz高キャリア動作を達成した。またこの結果より、高キャリア化によるインバータに対する利点効果を試算、リアクトルを1/3の値に設定してもリップル電流は同等以下であることが確認できた。 | ○ |

事業原簿 29頁

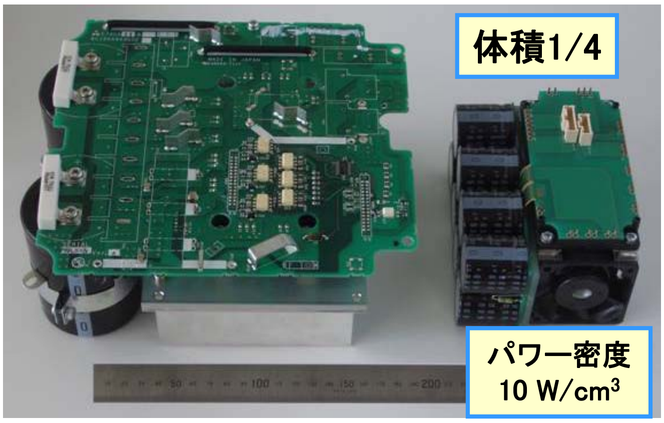


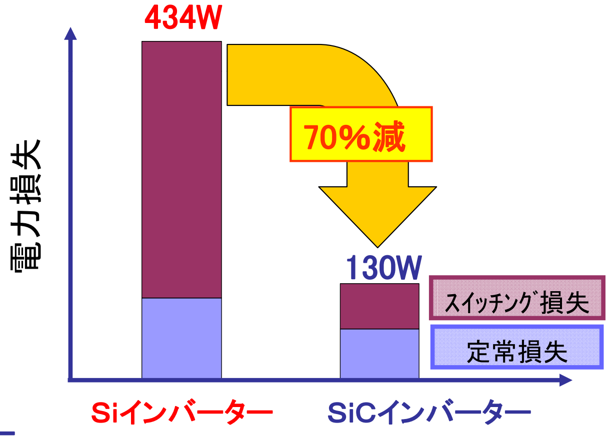


公開

# 14kVA小型SiCインバータユニット

**SiCインバーターユニットで世界最高の電力損失70%減を実証**
**（Siインバータユニット比）**



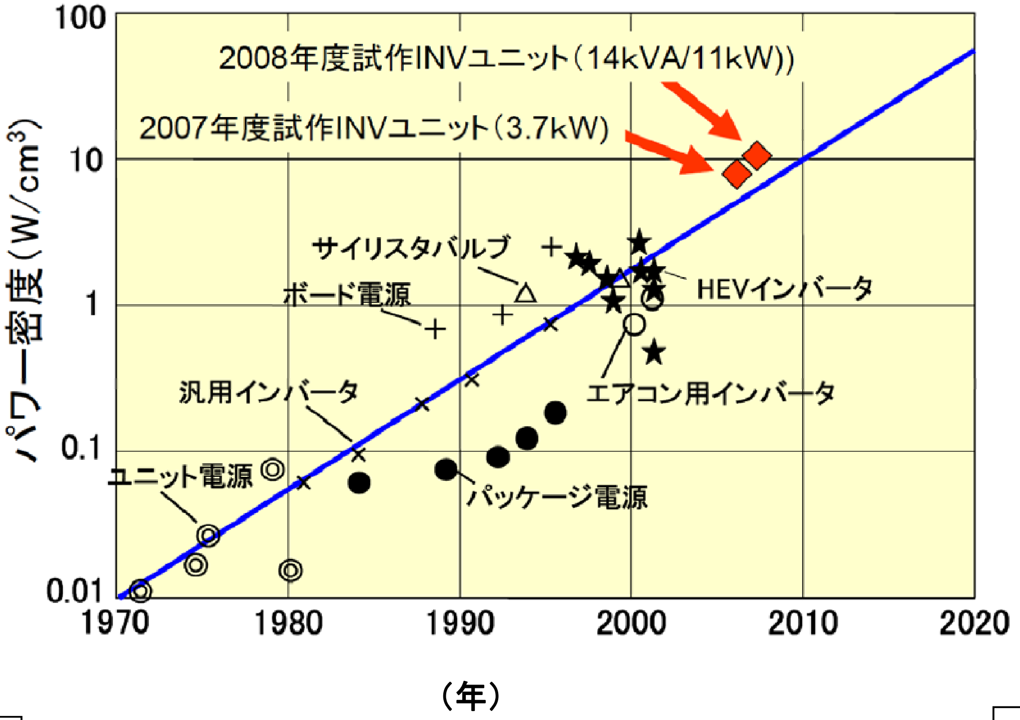




11kW出力時の電力損失

Siインバーター（11kW） → SiCインバーター 14kVA（11kW）

事業原簿 29頁

# インバータのパワー密度トレンドと本プロジェクト達成値




事業原簿 29頁





# 研究開発項目② ：高効率・高密度インバータ革新的高度化技術開発

課題1: インバーター大容量化基盤技術

5mm□級チップを試作し、電流容量100Aの性能を達成するのに必要な条件を明確にする。

課題2: インバータ信頼性向上基盤技術

5mm□級チップを試作し、実用素子に求められるゲート酸化膜の信頼性を達成する条件を明確にする。

課題3: インバーター高パワー密度化基盤技術

10A以上の低損失スイッチング素子の開発を行う。50 W/cm³以上のSiCインバータを実現に必要な条件を明らかにする。高速制御技術および250℃環境での動作の実装技術の指針を提示する。

事業原簿 6－10頁

公開

# 適時、適宜な情報の共有とダイナミックな研究展開

**低損失インバータ実証（伊丹サイト）**
・低損失・大容量素子
・短絡耐量・高速制御

**4インチプロセス**

**ウェハ品質**
・バルク結晶欠陥種・密度
・研磨面仕上げ
・エピ起因欠陥
・欠陥分布（空間相関、電界相関）
・幾何学的形状（そり、うねり・・・）
・残留不純物

**ウエハの供給元（バルク、エピ）**

**デバイス性能（大容量化、MOS信頼性）（つくばサイト）**
・耐圧・リーク電流
・ゲート移動度
・TZDB・TDDB・・
・デバイス結晶面

・プロセス欠陥
・プロセス改良

・低損失素子

**インバータの高パワー密度化（つくばサイト）**
・損失統合設計シミュレータ

**評価手法（つくばサイト）**
・SR－X-ray トポ/TEM
・カンデラ
・エミッション顕微鏡
・PL(JAXA)/EBIC(NIMS)
・SIMS
・・・・

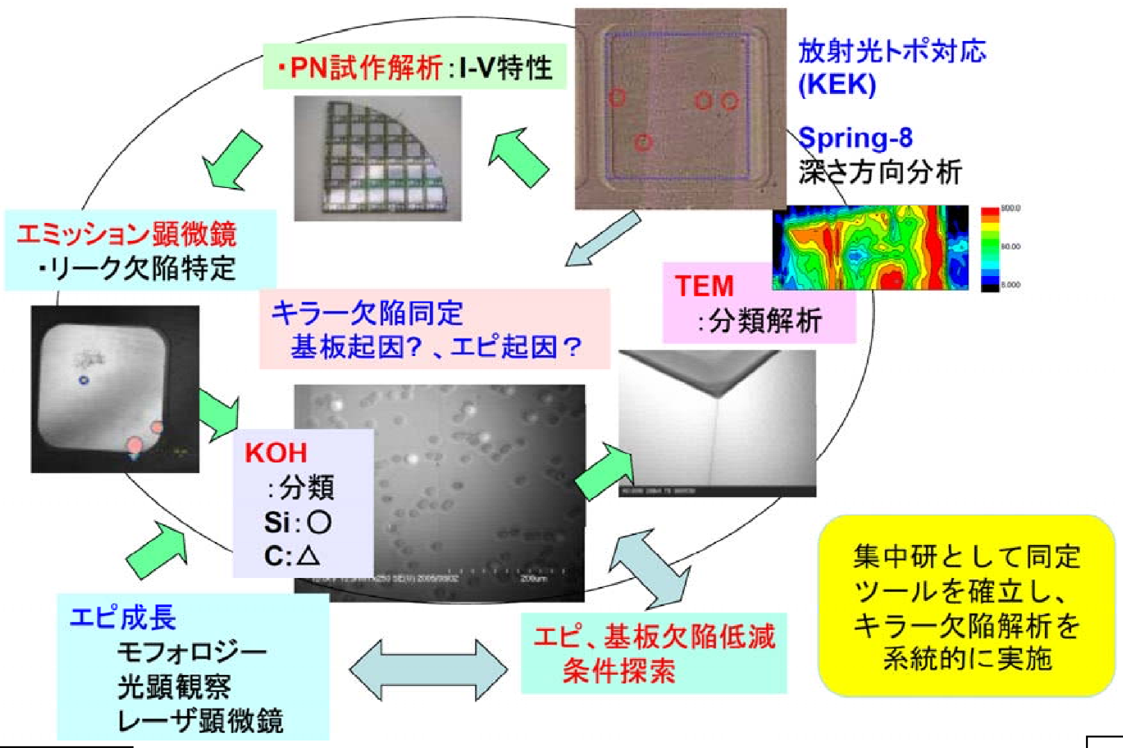
事業原簿 8－9頁





公開

# SiCウェハ欠陥とデバイス性能阻害要因の関係解明の具体的方法

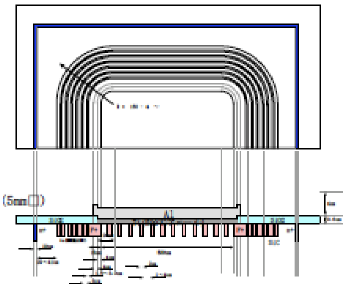


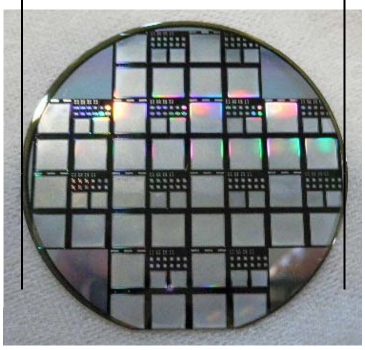

事業原簿 8－9頁

公開

# 5mm□（100A級）SBDの作製

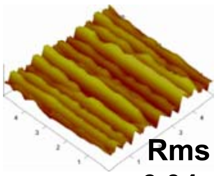
2 inch



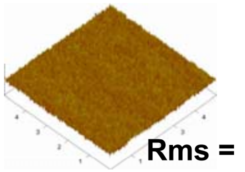


Cキャップ法による表面荒れ抑制
（H20春期加速案件）

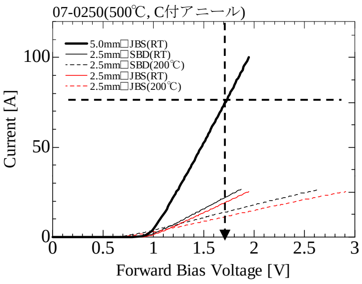
従来法 Cキャップ法

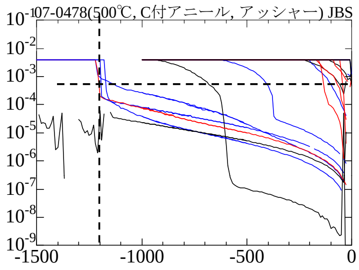


Rms = 6.04nm



Rms = 0.42nm




**1200V 5mm□JBS で歩留まり：25%**

SBD : Schottky Barrier Diode
JBS : Junction Barrier Schottky

事業原簿 28頁



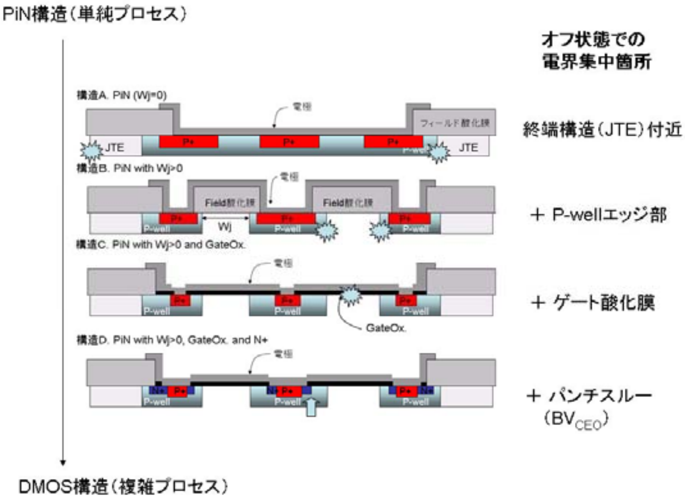


公開

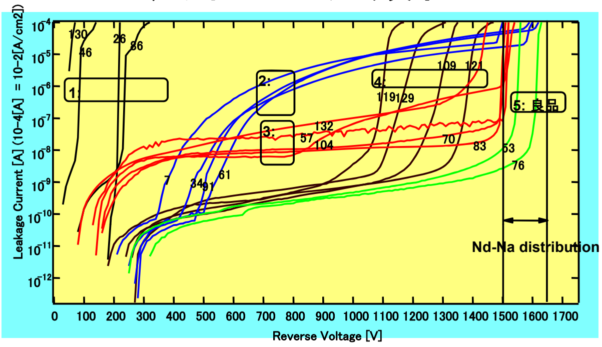
# DIMOS不良解析TEGによるキラー欠陥同定(1)

2.75mm□素子での
耐圧歩留まり(1000V)：30%

PiN接合TEG(評価素子)を用いて
不良要因を解析




不良素子の分類わけ




A構造

1. 低耐圧（＜300V）
2. 中電圧（～500V）から大きなリーク電流はあるが、耐圧は高い。
3. 低電圧から中程度のリーク電流はあるが、耐圧は高い。
4. リーク電流は低いが、耐圧が若干低い。
5. 良品

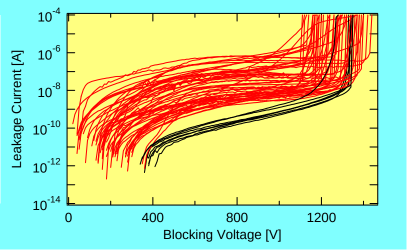
事業原簿 9−10

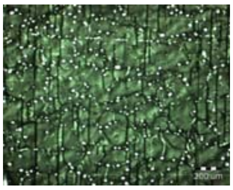
公開

# DIMOSにおけるリーク電流と転位密度

（構造A）

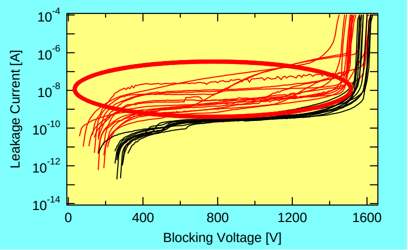
A社　欠陥多数

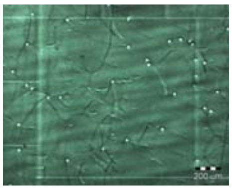


TSD=4000-6000cm$^{-2}$

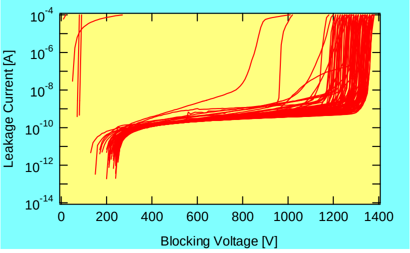
A社　標準品

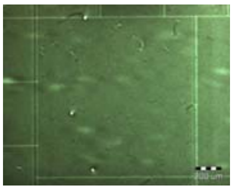


300-1000, 0-3000cm$^{-2}$

B社



100-200, 0-1200cm$^{-2}$

転位密度の高いウエハでは、
リーク電流の大きい素子が多数みられる。

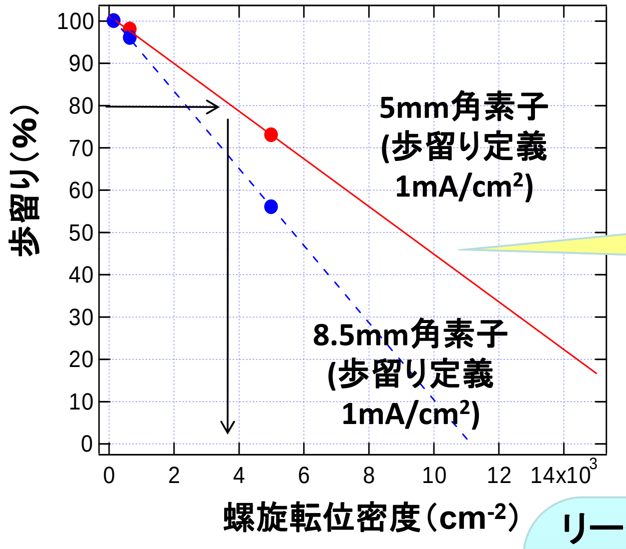




公開

# DIMOSにおける転位密度と歩留まり

リーク電流によって規定される
耐圧歩留りとTSD密度との関係

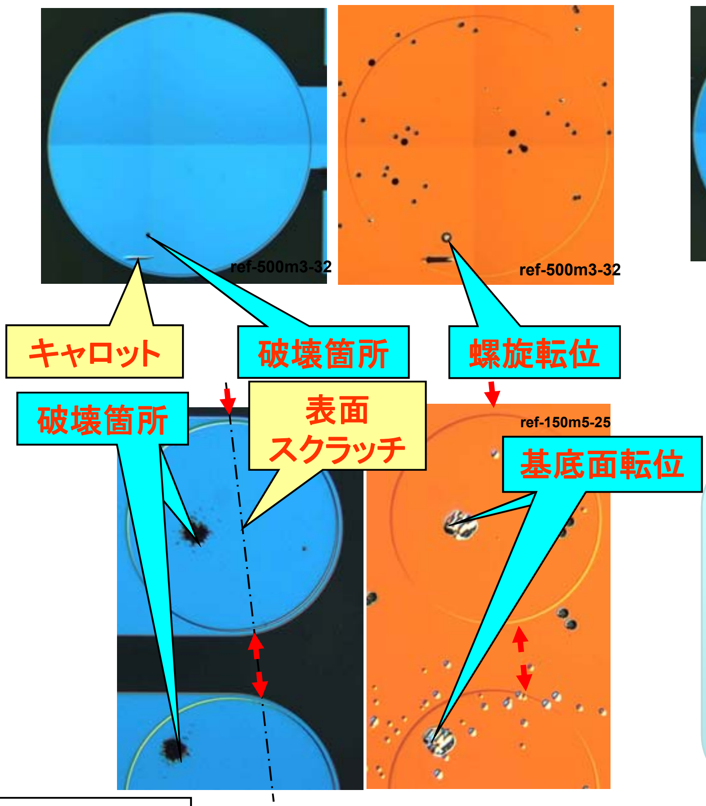


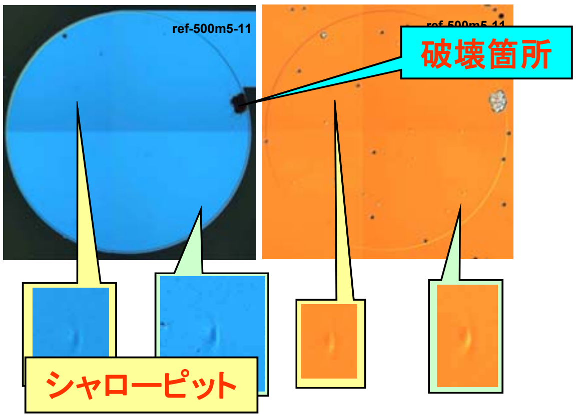

1mm□素子から5mm□、
8.5mm□の
高温でのリーク電流を予想

リーク電流で定義される耐圧不良には転位欠陥（螺旋転位）密度を4000/cm$^2$以下にする必要有り
→市販されているSiC基板でOK

公開

# 酸化膜破壊と各種ウェハ欠陥




酸化方法:DRY@1350℃

**熱酸化膜に対する欠陥の影響**

- 基底面転位:×
- 螺旋転位:×
- 転位を伴わないピット:○
- (再表面の)スクラッチ:○
- ダウンフォール:×
- 三角欠陥:×
- キャロット:○

事業原簿　30頁

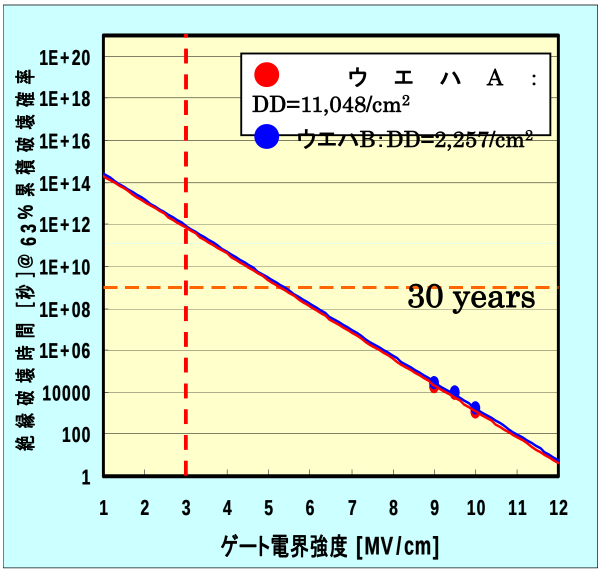




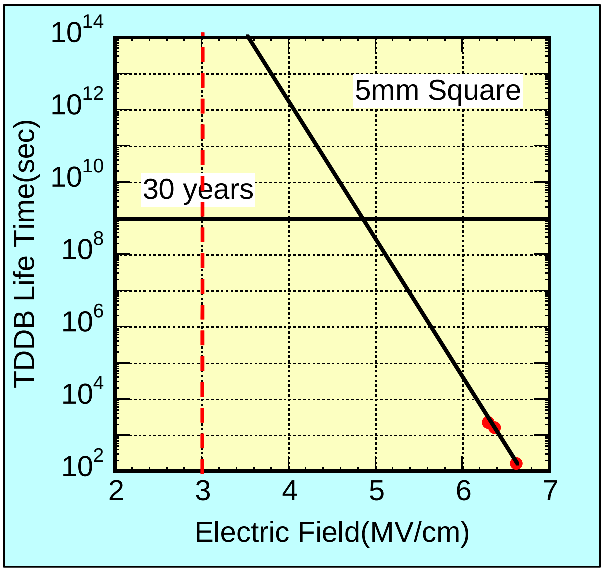
公開

# 大面積チップ(5mm□)での酸化膜の信頼性 (TDDB)

## Si面



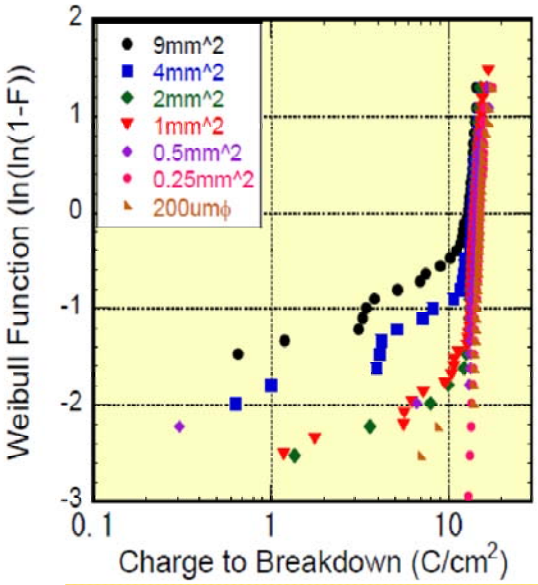

## C面

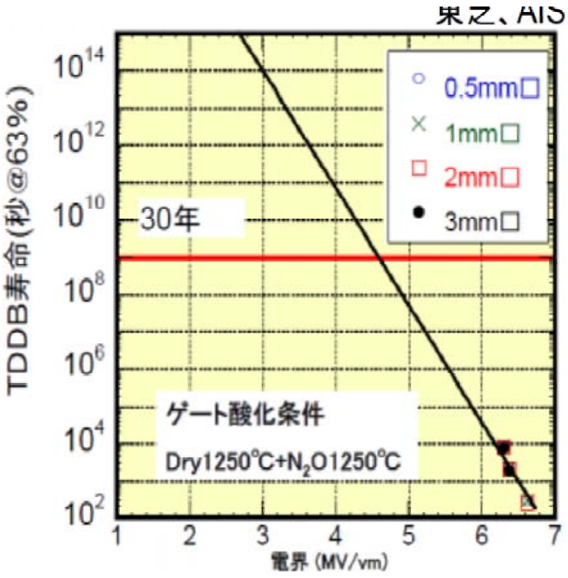



**市販のSiCウェハでも、**
**5mm□チップで信頼性寿命は30年を越えると推定**

事業原簿　33−34頁

# C面酸化膜の信頼性



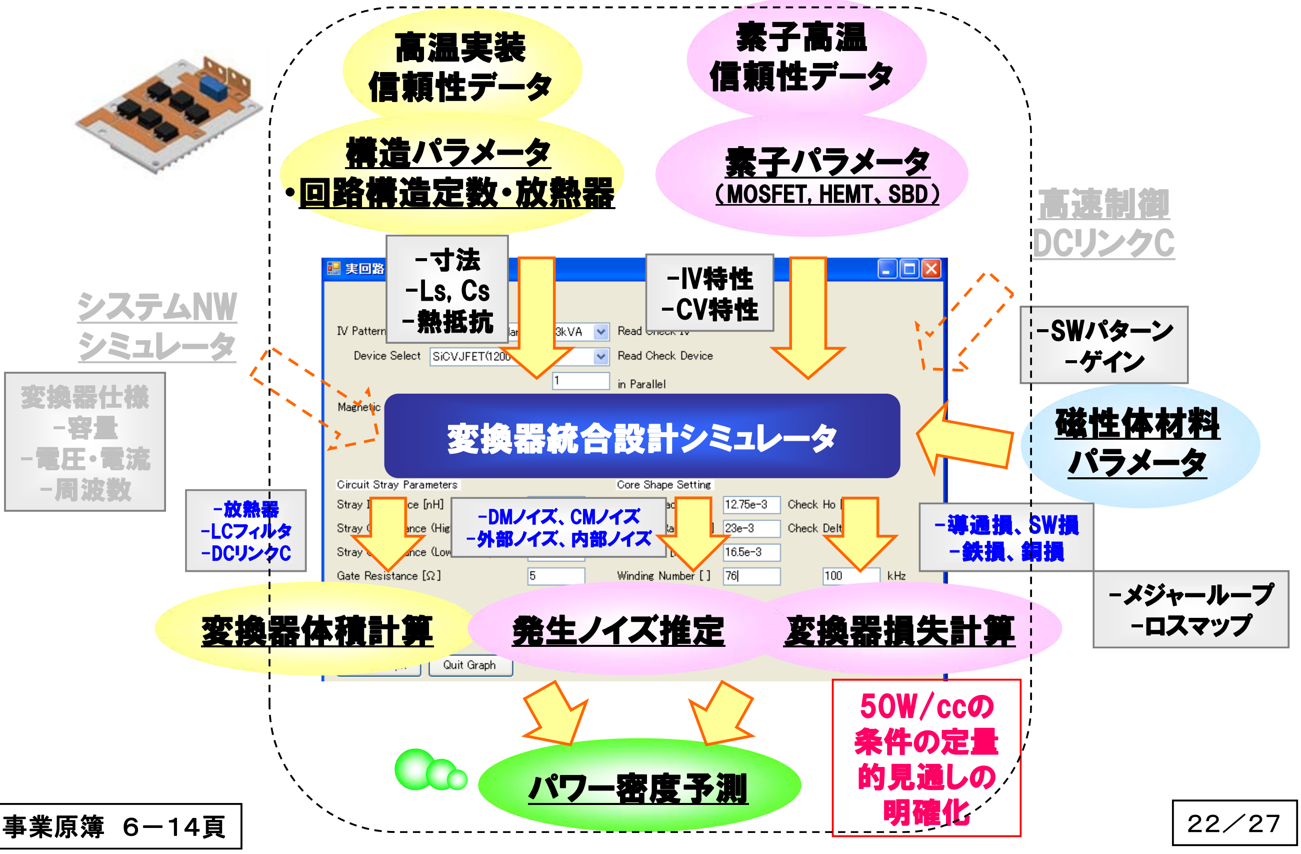




**真性破壊が主であるので破壊寿命は面積にほとんど依存しない。**
**外挿により5mm角までの素子で30年以上の寿命を確認した。**





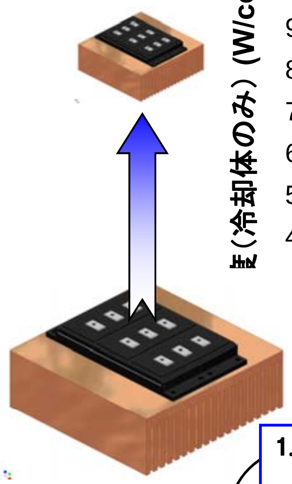
# 損失統合設計ツールによる50W/cm³の見通しへのアプローチ

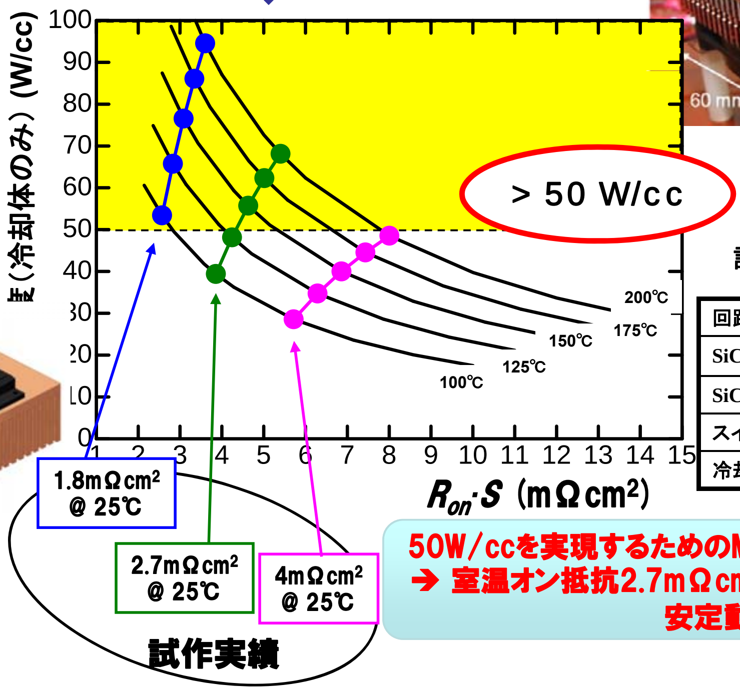


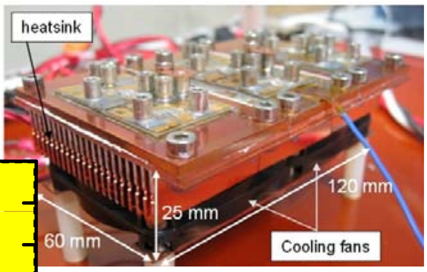
公開

# $50W/cm^3$ 実現への見通し試算例

統合損失設計ミュレータ　試作データ






計算条件

| | |
|---|---|
| 回路 | 三相インバータ |
| SiC-MOSFET耐圧 | 600V |
| SiC-MOSFET電流密度 | 200A/cm² |
| スイッチング周波数 | 20kHz |
| 冷却方式 | 片面強制空冷 |

**50W/ccを実現するためのMOSFET試作の目指す方向**
**➔ 室温オン抵抗2.7mΩcm²以下の素子のTj=200℃安定動作化**

事業原簿　41頁



「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発プロジェクト」
（事後評価）第1回分科会　資料5－2(2)

## 5. プロジェクトの概要説明

5．1　事業の位置づけ・必要性
5．2　研究開発マネジメント
5．3　研究開発成果
5．4　実用化の見通し

公開

## 4. 実用化の見通しについて　目標・成果と展開

| 技術課題 | アプローチと成果内容 | 達成した目標 | 展開 |
|---|---|---|---|
| ウェハ 評価手法 | ウェハ品質管理：カンデラによる欠陥分析などの評価<br>・X線トポ評価技術開発と欠陥種分類法を確立 | 各種手法の確立 | ・欠陥評価の標準化<br>・欠陥精密評価<br>・微量金属不純物評価など |
| デバイス 大容量化 | プロセス技術開発：高品質エピ技術、酸化/POA,活性化アニール（カーボンキャップ）など<br>・5mm□JBS-SBDで100A/チップ実証、高歩留り可能<br>・PIN：イオン注入密度，電界強度,金属不純物の影響<br>・DIMOS：高品質ウエハなら現状で高歩留り可能<br>：JFET領域上の酸化膜破壊→転位よりプロセス肝要<br>市販レベルの転位欠陥密度の基板でも、エピキラー欠陥発生させずにウエハを作製できれば、5mm□100A級可能 | 100A/チップの条件の明確化 | |
| デバイス 高信頼化 | ・Si面MOS信頼性：→高移動度と信頼性の両立<br>：エピ欠陥はキラー欠陥、TEDは深刻でない<br>：エピ層にピットを出さないプロセスの構築重要<br>・C面MOS信頼性：高移動度と高信頼性の実用可能展開<br>：Si面より結晶欠陥に鈍感<br>：エピ欠陥はキラー欠陥→5mm□OK | 実用素子のゲート信頼性の明確化 | ・高信頼・低オン抵抗デバイス |
| 変換器 高パワー密度化 | 統合設計技術：開発済みCADの高度化<br>・低オン抵抗デバイス：0.1Ω/10A級MOSFET(～1kV)作成<br>・高パワー密度設計法：低損失/高温動作電力変換器条件提示<br>・高温実装：要素技術の実例と重要性<br>・高機能技術：高速連携変換器設計例 | 50W/cm3の可能性の明確化 | ・高温デバイス信頼性と実装技術<br>・30W/cm$^3$変換器の実証 |

共通横串技術

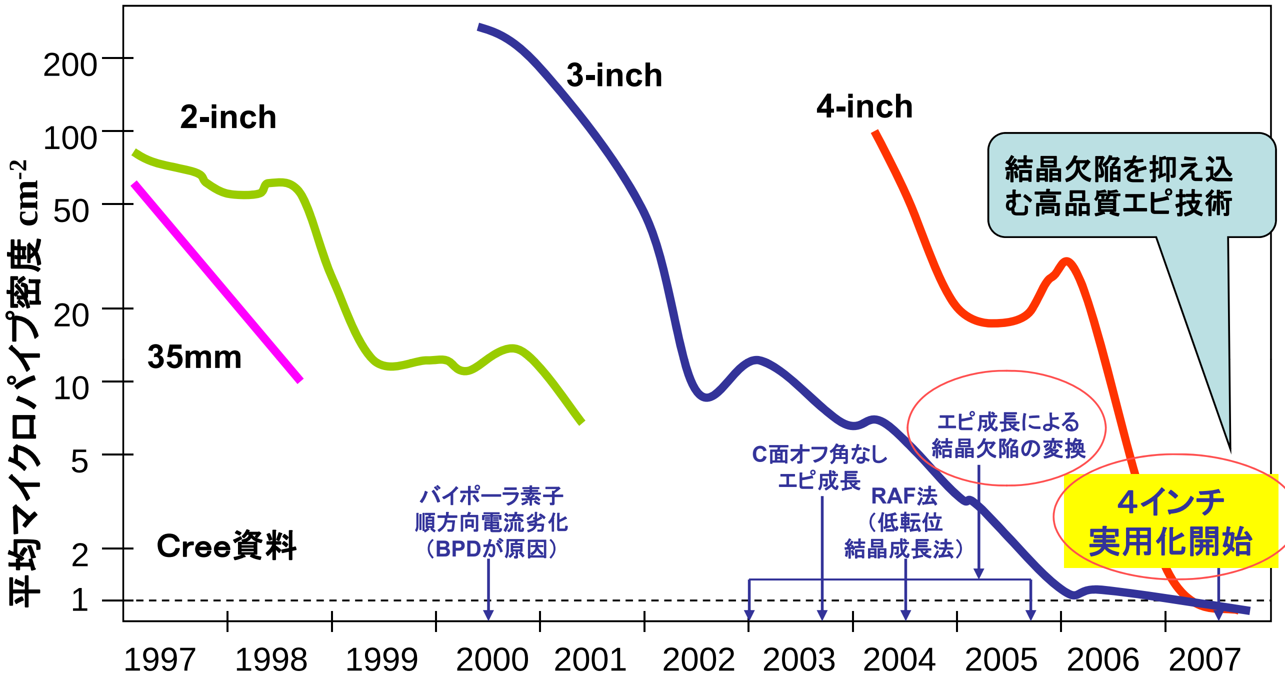
事業原簿　36－42頁



公開

## 4. 実用化の見通しについて

### 実用化を担保するSiCウェハの大口径化と高品質化のトレンド




本プロジェクトによるウエハの安定購入と品質・実用化情報の提供により、国内ウエハメーカーにおいて、ウエハ口径の拡大、品質の向上が著しい。実用化の最低口径4インチ高品質ウエハが実現し、事業化の見通し。デバイスキラー欠陥の解明とエピによる欠陥変換技術との併用により、実用化へ　　　の確実なステップが切れる見通し。

事業原簿　45－47頁

## (3)知的財産権、成果の普及

| | H18 | H19 | H20 | 計 |
|---|---|---|---|---|
| 特許出願 | 0 | 5 | 9 | 14件 |
| 論文(査読付き) | 2(1) | 10(10) | 27(27) | 39件 |
| 研究発表・講演 | 4 | 29 | 48 | 81件 |
| 受賞実績 | 0 | 0 | 2 | 2件 |
| 新聞・雑誌等への掲載 | 1 | 2 | 1 | 4件 |
| 展示会への出展 | 0 | 1 | 2 | 3件 |

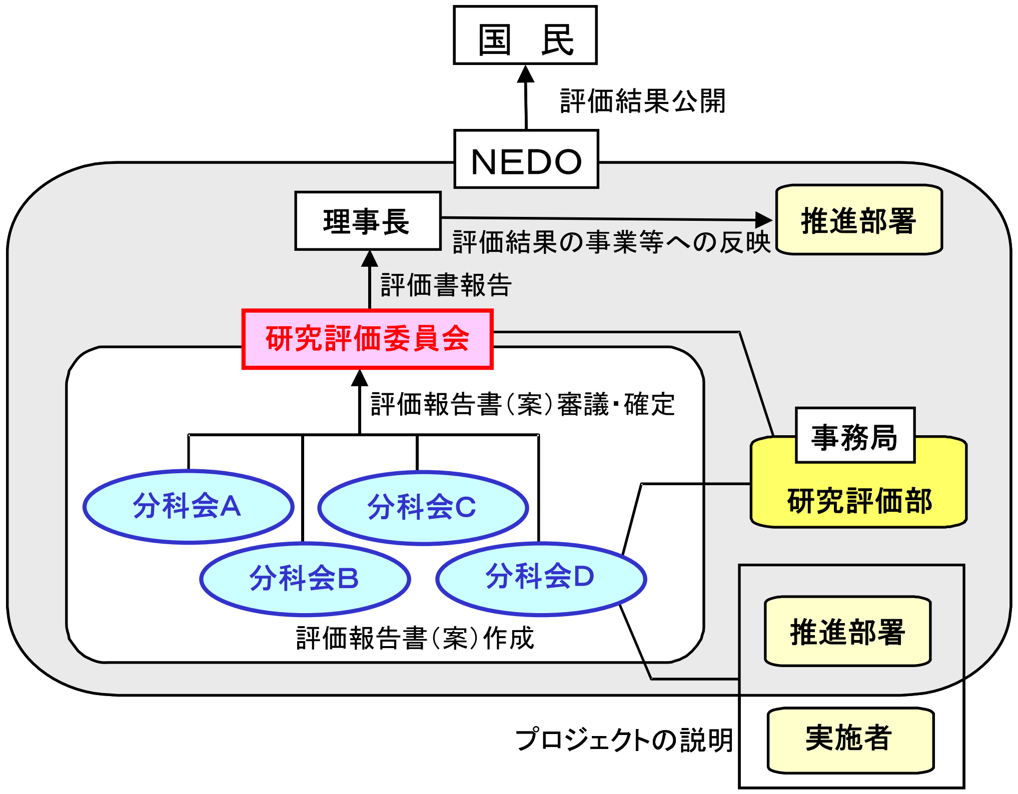
※ ： 平成21年度7月20日現在

# 参考資料１　　評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて研究評価を実施する。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



## １．評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において。

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
- 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む
- 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する

としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

## ２．評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、分科会委員名簿にある７名を選任した。

なお、本分科会の事務局については、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構研究評価広報部が担当した。

## ３．評価対象

平成１８年度に開始された「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」プロジェクトを評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

４．評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び研究実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、研究実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

５．評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、研究評価委員会による『各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格、中間・事後評価の別等に応じて、各分科会において判断すべき者である。』との考え方に従い、第１回分科会において、事務局が、研究評価委員会により示された「標準的評価項目・評価基準」（参考資料 1-７頁参照）をもとに改定案を提示し、承認されたものである。

プロジェクト全体に係わる評価においては、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義や実用化への見通し等について評価した。各個別テーマに係る評価については、主にその目標に対する達成度等について評価した。

## 評価項目・評価基準

### １．事業の位置付け・必要性について

(1)ＮＥＤＯの事業としての妥当性

- IT イノベーションプログラム・エネルギーイノベーションプログラムの下で、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、ＮＥＤＯの関与が必要とされる事業か。
- 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2)事業目的の妥当性

- 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向等から見て、事業の目的は妥当か。

### ２．研究開発マネジメントについて

(1)研究開発目標の妥当性

- 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2)研究開発計画の妥当性

- 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携が十分に行われ

る体制となっているか。

- 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4)情勢変化への対応等

- 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか)。計画見直しを適切に実施しているか。

## ３．研究開発成果について

(1)目標の達成度

- 成果は目標値をクリアしているか。
- 全体としての目標達成はどの程度か。
- 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることが期待できるか。
- 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- 成果は汎用性があるか。
- 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。

(4)成果の普及

- 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- 一般に向けて広く情報発信をしているか。

４．実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

・ 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。
・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通しは立っているか。

(2)波及効果

・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

# 標準的評価項目・評価基準（事後評価）

２００８．３．２７

**【事後評価　標準的評価項目・評価基準の位置付け（基本的考え方）】**

標準的評価項目・評価基準は、第１７回研究評価委員会（平成２０年３月２７日付）において以下のとおり定められている。（本文中の記載例による１･･･、２･･･、３･･･、４･･･が標準的評価項目、それぞれの項目中の(1)･･･、(2)･･･が標準的評価基準、それぞれの基準中の・　･･･が視点）

ただし、これらの標準的評価項目・評価基準は、研究開発プロジェクトの事後評価における標準的な評価の視点であり、各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格等に応じて、各分科会において判断すべきものである。

## １．事業の位置付け・必要性について

(1)ＮＥＤＯの事業としての妥当性

- 特定の施策（プログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、ＮＥＤＯの関与が必要とされる事業か。
- 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2)事業目的の妥当性

- 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

## ２．研究開発マネジメントについて

(1)研究開発目標の妥当性

- 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2)研究開発計画の妥当性

・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and／or 競争が十分に行われる体制となっているか。
・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4)情勢変化への対応等

・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか)。計画見直しを適切に実施しているか。

３．研究開発成果について

(1)目標の達成度

・ 成果は目標値をクリアしているか。
・ 全体としての目標達成はどの程度か。
・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることが期待できるか。

- 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- 成果は汎用性があるか。
- 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- 一般に向けて広く情報発信をしているか。

## ４．実用化、事業化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
- 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2)事業化までのシナリオ

- ＮＥＤＯ後継プロジェクト、ＮＥＤＯ実用化助成、企業内研究等、プロジェクト終了後の事業化までの道筋は明確か。
- コストダウン、競合技術との比較、導入普及、事業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しは立っているか。

(3)波及効果

・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

※基礎的・基盤的研究及び知的基盤・標準整備等の研究開発の場合は、以下の項目・基準による。

＊基礎的・基盤的研究開発の場合

３．研究開発成果について

(1)目標の達成度

- 成果は目標値をクリアしているか。
- 全体としての目標達成はどの程度か。
- 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることが期待できるか。
- 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- 成果は汎用性があるか。
- 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- 一般に向けて広く情報発信をしているか。

４．実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。

・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通しは立っているか。
・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2)波及効果
・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

＊知的基盤・標準整備等の研究開発の場合

３．研究開発成果について

(1)目標の達成度
・ 成果は目標値をクリアしているか。
・ 全体としての目標達成はどの程度か。
・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義
・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることが期待できるか。
・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
・ 成果は汎用性があるか。
・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
・ 成果は公開性が確保されているか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組
・ 研究内容に新規性がある場合、知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- 一般に向けて広く情報発信をしているか。

## ４．実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
- 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
- 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ＪＩＳ化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注）国内標準に限る
- 一般向け広報は積極的になされているか。

(2)波及効果

- 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

# 参考資料２　　　評価に係る被評価者意見

研究評価委員会（分科会）は、評価結果を確定するにあたり、あらかじめ当該実施者に対して評価結果を示し、その内容が、事実関係から正確性を欠くなどの意見がある場合に、補足説明、反論などの意見を求めた。研究評価委員会（分科会）では、意見があったものに対し、必要に応じて評価結果を修正の上、最終的な評価結果を確定した。

評価結果に対する被評価者意見は全て反映された。

本研究評価委員会報告は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO 技術開発機構）研究評価部が委員会の事務局として編集しています。

平成２２年２月

NEDO 技術開発機構
研究評価部
統括主幹　竹下　　満
主幹　寺門　　守
担当　山田　武俊

＊研究評価委員会に関する情報は NEDO 技術開発機構のホームページに掲載しています。
（http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/index.html）

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地
ミューザ川崎セントラルタワー20F
TEL 044-520-5161　FAX 044-520-5162